

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMATICO PARA
DETERMINAR EL DESGASTE GENERADO EN LOS RODILLOS
DE TRABAJO QUE OPERAN EN CASTILLOS F4-F6, DE UN
MOLINO DE LAMINACION EN CALIENTE.**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA
DE MATERIALES.**

PRESENTA

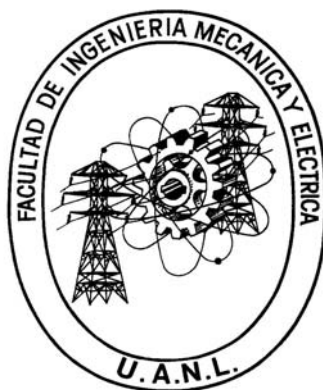
M.C. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., ENERO DEL 2007.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMATICO PARA
DETERMINAR EL DESGASTE GENERADO EN LOS RODILLOS
DE TRABAJO QUE OPERAN EN CASTILLOS F4-F6, DE UN
MOLINO DE LAMINACION EN CALIENTE.**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA
DE MATERIALES.**

PRESENTA

M.C. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., ENERO DEL 2007.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "DESARROLLO DE UN MODELO MATEMATICO PARA DETERMINAR EL DESGASTE GENERADO EN LOS RODILLOS DE TRABAJO QUE OPERAN EN CASTILLOS F4-F6, DE UN MOLINO DE LAMINACION EN CALIENTE ", realizada por el alumno M.C. Rumualdo Servin Castañeda, matrícula 926938, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El comité de Tesis

Asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz

Coasesor

Dr. Jorge Ramirez Cuellar

Coasesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata

Revisor

Dr. Alberto Pérez Unzueta

Revisor

Dr. Rafael Mercado Solís

VoBo.

Dr. Guadalupe A. Castillo Rodríguez

San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Enero del 2007.

AGRADECIMIENTOS.

A la dirección del Instituto Tecnológico Superior de Monclova por el apoyo para realizar mis estudios.

A los directivos de la Empresa Aços Villares S.A de C.V por su apoyo incondicional para el desarrollo de este proyecto.

A los trabajadores de las diferentes Industrias que colaboraron de alguna manera para el desarrollo de este proyecto. En especial a Jorge y Eduardo.

A mis maestros que a lo largo de mis estudios me han dejado grandes enseñanzas.

A mi asesor, el Dr. Rafael Colás por su apoyo y dirección.

A mis coasesores por la revisión de este trabajo y sus valiosas contribuciones.

A mi esposa Tere por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis padres y hermanos que me brindan cariño y confianza.

Pero sobre todo deseo agradecer a **Dios** que me da vida y salud para alcanzar las metas.

PROLOGO.

Desde el comienzo de la civilización, los materiales han sido utilizados por el hombre para mejorar su nivel de vida, los productos de acero se pueden encontrar en todas partes, solo basta mirar al entorno para apreciarlos.

El acero constituye también un pilar fundamental de la economía mundial, los incrementos de las materias primas y el desarrollo de nuevos materiales han obligado a los productores de acero a desarrollar avances tecnológicos que les permitan competir en el mercado.

La producción de acero constituye una parte importante de la economía actual, más del 50% de los productos de acero se obtienen mediante el proceso de laminación en caliente, el cual consiste en hacer pasar al planchon por dos rodillos de trabajo que dan forma a la lámina. Este proceso dinámico trae como consecuencia el desgaste de los rodillos de laminación.

El desgaste en los rodillos es de vital importancia en el proceso de laminación en caliente debido a que los parámetros de calidad superficial y perfil de la lámina dependen del desgaste ocasionado.

El modelo matemático establecido en éste estudio es una herramienta muy importante que es utilizada para entender el fenómeno del desgaste que se obtiene en el proceso de laminación en caliente y establece una base para desarrollar en un futuro más estudios que permitan controlar las variables que influyen en este proceso.

A. Hernandez
Laminación en Caliente

INDICE

RESUMEN	1
----------------------	----------

CAPITULO 1. INTRODUCCION A LA LAMINACION Y AL FENOMENO DE DESGASTE.

1.1 Introducción	2
1.2 Importancia de la tribología y su desarrollo mundial	4
1.3 Perspectivas en el desarrollo y la investigación tribológica	6
1.4 Mecanismos y procesos de desgaste	7
Referencias bibliográficas	8

CAPITULO 2. FRICCION, LUBRICACION Y DESGASTE.

2.1 Fricción	9
2.1.1 Nomenclatura de la fricción	11
2.1.2 Pruebas estándar de fricción	14
2.2 Lubricación	15
2.2.1 Los lubricantes y sus características	15
2.2.2 Los aditivos y sus características	18
2.2.3 Características y funciones de los lubricantes utilizados en el formado de metales	20
2.2.4 Lubricación de elementos mecánicos	20
2.3 Desgaste	26
2.3.1 Desgaste adhesivo	26
2.3.2 Desgaste abrasivo	26
2.3.3 Desgaste corrosivo	27
2.3.4 Desgaste superficial	27
2.3.5 Otros tipos de desgaste	27
2.3.6 Pruebas de desgaste	28
Referencias bibliográficas	30

CAPITULO 3. PRODUCCION DE ACERO Y PRINCIPIOS DE LAMINACION.

3.1 Introducción	31
3.2 Proceso primario y acería	33
3.3 Clasificación del proceso de laminación	35
3.4 Requerimientos básicos para que se efectúe la laminación	37
3.5 Mecánica de la laminación	38
3.5.1 Compresión por deformación plana	38
3.5.2 Fuerzas durante la laminación	42
3.5.3 Teorías de laminación	46
Referencias bibliográficas	53

CAPITULO 4. DESCRIPCION Y FABRICACION DE RODILLOS DE LAMINACION.

4.1 Introducción y clasificación de los molinos de laminación	54
4.2 Construcción de un molino de laminación	57
4.3 Descripción de un rodillo de laminación	58
4.4 Clasificación de los rodillos de laminación	60
4.5 Proceso de producción de rodillos vaciados centrifugados	61
4.5.1 Preparación de templaderas y moldeo	63
4.5.2 Fusión	66
4.5.3 Centrifugado	67
4.5.4 Desmoldeo y rebabeo	68
4.5.5 Tratamiento térmico	68
4.5.6 Maquinado	70
4.5.7 Embalaje	72
4.6 Especificaciones de rodillos de laminación	72
4.6.1 Castillos donde se usan los rodillos	73
4.6.2 Porcentaje de reducción	73
4.6.3 Temperatura de laminación	73
4.6.4 Enfriamiento del rodillo	74
4.6.5 Temperatura del rodillo	75
4.6.6 Rendimiento del rodillo	75
4.7 Inspección y pruebas aplicadas a rodillos de laminación	76
4.7.1 Análisis químico	76
4.7.2 Metalografía	77
4.7.3 Dureza	79
4.7.4 Tensión	82
4.7.5 Compresión	83
4.7.6 Inspección por líquidos penetrantes	84
4.7.7 Inspección ultrasónica	85
Referencias bibliográficas	88

CAPITULO 5. MODELOS MATEMATICOS DE DESGASTE.

5.1 Introducción	89
5.2 Area de contacto	90
5.2.1 Contacto de superficies	95
5.2.2 Teoría de contacto elástico de Hertz	98
5.2.2.1 Presión aplicada en una sección circular	100
5.3 Descripción del desgaste abrasivo	104
5.4 Modelos matemáticos existentes	107
Referencias bibliográficas	109

CAPITULO 6. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO.

6.1 Selección de variables	110
6.2 Desarrollo del modelo	111
6.3 Cálculo de coeficientes de desgaste	117
6.3.1 Coeficiente de desgaste generado entre el rodillo de trabajo y la lámina	119
6.3.2 Coeficiente de desgaste generado entre rodillos de laminación	124
Referencias bibliográficas	129

CAPITULO 7. ANALISIS DE RESULTADOS.

7.1 Introducción	130
7.2 Análisis de datos en campo	131
7.2.1 Dureza superficial analizada en campo	132
7.2.2 Replicas metalográficas tomadas en campo y analizadas en laboratorio	133
7.2.3 Rugosidad superficial del perfil	135
7.2.4 Cambios de temperatura registrados en campo	143
7.3 Análisis de datos tomados en planta	147
7.3.1 Perfil de desgaste de los rodillos de laminación	147
7.3.2 Variables que influyen en el cambio de rodillos por desgaste	150
7.4 Comparación de resultados con modelos de control y gráficas.....	166
Referencias bibliográficas	172

CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 Conclusiones	173
8.2 Recomendaciones para trabajos futuros	175
8.3 Recomendaciones para aplicación industrial	175

ARCHIVO ELECTRONICO ALMACENADO EN CD

Anexo I	Perfil de desgaste de los rodillos de trabajo
Anexo II	Calculo del coeficiente de desgaste para los rodillos de trabajo
Anexo III	Calculo del coeficiente de desgaste para los rodillos de apoyo
Anexo IV	Resumen de dureza superficial
Anexo V	Resumen de rugosidad superficial
Anexo VI	Resumen de temperatura superficial
Anexo VII	Perfil de desgaste de rodillos de laminación

RESUMEN.

La importancia del desgaste en los procesos de formación de metales, en especial para el proceso de laminación en caliente así como la influencia de las variables que intervienen en el proceso productivo, son las principales causas para la elaboración de este estudio. En este trabajo se describe el desarrollo de un modelo matemático, partiendo de la ecuación de Archard, la cual se utiliza para predecir el desgaste promedio que se puede generar en un rodillo de trabajo instalado en los castillos F4-F6 de un molino de laminación en caliente.

Se recopiló información estadística referente a las condiciones de operación en el molino de laminación, se graficaron los datos y se obtuvieron los coeficientes de desgaste para cada castillo, posteriormente se aplicó el modelo obtenido para comparar los resultados recabados en la industria con los calculados por medio del modelo matemático. Se le dio seguimiento durante tres meses a una pareja de rodillos que trabajaron en los castillos seis, cinco y cuatro, y se pudo comprobar que el modelo funcionó para dos trenes de laminación con un margen de error de 20% con respecto a los datos reales.

CAPITULO 1

INTRODUCCION A LA LAMINACION Y EL FENOMENO DE DESGASTE.

1.1 INTRODUCCION.

Hace miles de años el hombre primitivo comenzó a fabricar sus herramientas de trabajo y de caza con materiales compuestos de cobre y estaño (bronce), esta aleación se fundía y vaciaba en moldes que contenían la figura que deseaban. El hombre primitivo descubrió rápidamente que existía otro método para la fabricación de sus herramientas, que consistía en darle forma al producto vaciado cuando éste se encontraba en estado plástico (entre líquido y sólido), descubriendo que de esta forma se obtenían mejores propiedades que por el método de vaciado. Con la aplicación de esta aleación dio inicio a la era de los metales, la cual fue conocida como "La edad del bronce". La edad de bronce inició en el año 3000 A.C y terminó cuando se le comenzó a dar aplicación al hierro en su estado natural en el año 1200 A.C. Con esta aplicación dio inicio a lo que se conoció como "La edad de hierro", en la cual el hombre aprendió a extraer el mineral de hierro del mineral metálico, el cual se conocía en aquel tiempo solamente en meteoritos. A partir de entonces ha sido una preocupación constante la evolución en el proceso de producción de hierro y acero así como los procesos de trabajado de metales.

Uno de los métodos que más aceptación ha tenido desde entonces se conoce como "laminación", que consiste en hacer pasar a la pieza de metal entre dos rodillos, que giran en sentido contrario uno con respecto del otro, durante el cual se observan los fenómenos de reducción, alargamiento y ensanchamiento lateral de la pieza.

Desde el comienzo de la civilización el acero ha sido utilizado por el hombre para mejorar su nivel de vida. Los productos de acero se pueden encontrar en todas partes, sólo basta mirar al entorno para apreciar esto. La producción de este material y su procesado hasta convertirlo en producto acabado, constituye una parte importante de la economía actual.

Más del 50% de los productos de acero se obtienen mediante el proceso de laminación en caliente, proceso que requiere de un molino de laminación en el que las herramientas principales son un par de rodillos que están en contacto directo con la lámina rolada en caliente. La aplicación de grandes fuerzas sobre los rodillos de laminación, en combinación con otras variables como temperatura, homogeneidad, velocidad, dureza, enfriamiento, par de torsión, reducción, etc., producen un desgaste en los rodillos, razón por la cual se deben de realizar cambios continuos de estas herramientas para evitar problemas posteriores como calidad del material producido o accidentes de trabajo derivados por el desgaste. Así como gastos innecesarios debido al exceso de material rectificado por desconocimiento de un modelo que permita predecir el desgaste que se va a generar en cada campaña de laminación [1].

En la actualidad existen infinidad de estudios desarrollados para analizar el desgaste de piezas que se encuentran en movimiento y debido al contacto generan desgaste. Una de las ciencias que se especializa en este estudio es la Tribología, ciencia que ha tenido un importante desarrollo debido al ahorro económico obtenido en los diferentes componentes mecánicos que han sido estudiados [2].

1.2 IMPORTANCIA DE LA TRIBOLOGIA Y SU DESARROLLO MUNDIAL.

El concepto de “ Tribología ” fue usado por primera vez en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña el 9 de marzo de 1966, por lo que esta fecha se reconoce como la del nacimiento de la tribología como una nueva disciplina científica. Ya en este informe se señalaba con gran certeza el carácter multidisciplinario de esta ciencia, en la que entre otras participaban la física, la química, la metalurgia, la economía, la ciencia de materiales, la matemática y la computación.

La palabra tribología se deriva del término griego tribos, el cual puede entenderse como “frotamiento o rozamiento”, así que la traducción literal de la palabra podría ser, “la ciencia que estudia el frotamiento”. Los diccionarios definen a la tribología como “ la ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas ” [2]. La tribología es la ciencia que aplica un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento y desgaste del equipo técnico, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas.

En sí, la tribología podría parecer algo nuevo, pero solamente el término como tal lo es, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran soportados por medio de bases hechos de cornamentas o huesos. Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el año 3500 A.C., lo cual ilustra el interés de los antepasados por reducir el esfuerzo aplicado en los movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción, el desgaste y los lubricantes, esto lo aplicaban en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante, reduciendo la fricción y el desgaste [2].

La tribología se centra en el estudio de tres fenómenos; la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto de este fenómeno y la lubricación como un medio para reducir la fricción y el desgaste. La tribología está presente en prácticamente todos los aspectos de la maquinaria, motores y componentes de la industria en general. Los componentes mecánicos que más comúnmente son analizados por los fenómenos tribológicos son: rodamientos, sellos, anillos de pistones, cepillos, embragues, frenos, engranes y levas. Actualmente el fenómeno de desgaste y los principios de la tribología son analizados en aplicaciones tales como: extrusión, rolado, fundición, forja, procesos de corte, prótesis articulares, etc.

Algunos de los beneficios que se obtienen al aplicar los conocimientos de la tribología son: ahorro de materias primas, aumento en la vida útil de las herramientas y la maquinaria, ahorro de recursos naturales, ahorro de energía, protección al medio ambiente y por consiguiente ahorro económico.

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes ó deslizantes. De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la ignorancia en tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto (\$200 billones de dólares por año en 1966), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria. Según Jost (1966,1976), el Reino Unido podría ahorrar aproximadamente 500 millones de libras al año y los Estados Unidos llegarían a ahorrar hasta 16 billones de dólares al año utilizando mejores prácticas tribológicas. Este ahorro es significativo y puede obtenerse sin hacer una gran inversión de capital [3].

1.3 PERSPECTIVAS EN EL DESARROLLO Y LA INVESTIGACION TRIBOLOGICA.

En las últimas décadas la tribología se convirtió en una de las ciencias de más rápido desarrollo. Esto lo confirma el incremento del número de cátedras universitarias creadas en tribología y las recomendaciones y medidas aplicadas por varios gobiernos de países desarrollados entre ellos, Gran Bretaña, Estados Unidos de Norte América, Japón, Alemania y la ex Unión Soviética. Hoy cada día es más factible calcular el desgaste y como los procesos para lograrlo se tornan más económicos y fáciles, dentro de algunos años esto será exigencia para las maquinas y sus elementos, incrementándose los métodos de control y las medidas preventivas. El desgaste, su control y diagnostico formará parte de los sistemas de calidad. Para la aplicación y desarrollo de la tribología es requisito indispensable la aplicación de los métodos y técnicas de cómputo. Es la tarea de los tribólogos garantizar la efectividad y fiabilidad del trabajo de las máquinas, las cuales cada día tienen una mayor exigencia.

En la selección de la estrategia a seguir en las investigaciones tribológicas para cada institución o país es necesario plantearse las siguientes preguntas: ¿cuáles sistemas técnicos se basan en problemas tribologicos o pueden nutrirse del desarrollo de la tribología? ¿en cuáles industrias la aplicación de la tribología puede tener un mayor efecto económico por reducción de las perdidas por fricción y la disminución de los costos de mantenimiento por problemas de desgaste? dentro de estas industrias ¿cuáles son los pares de fricción críticos en los aspectos antes planteados?.

Recientemente en Estados Unidos se reunieron grupos de expertos de diferentes países, entre los que se encontraban Czichos, Tabor, Suh, Klaus y otros, y debatieron las principales demandas industriales en la investigación de problemas tribologicos. Los problemas fueron divididos por ramas, distribuidos de la siguiente manera:

Naturaleza de la fricción. Mecanismos y proceso del desgaste. Modelación de los problemas tribológicos. Modelación de tribosistemas. Materiales tribológicos y lubricantes. Nuevos métodos experimentales y de diagnóstico. Problemas fundamentales de los ensayos. Química de los lubricantes [4].

1.4 MECANISMOS Y PROCESOS DE DESGASTE.

En los últimos años se establecieron muchos mecanismos y procesos de desgaste, tales como el adhesivo, el abrasivo, el de fatiga, el de corrosión y el de separación o desprendimiento por capas. La mayoría de estos mecanismos han sido confirmados por ensayos de laboratorio; pero, el área o región donde cada uno se produce no ha sido totalmente definida. En la mayoría de los sistemas tribológicos, en el proceso de desgaste, intervienen varios mecanismos, lo que hace muy complejo identificar el mecanismo predominante y seleccionar la forma concreta de contrarrestar los efectos del desgaste. Es por ello que es conveniente siempre tratar de clasificar correctamente estos mecanismos en cada sistema tribológico, estableciendo una correlación entre el mecanismo de desgaste y el proceso real en que éste ocurre. Es necesario, además, tener en cuenta los cambios que tienen lugar en el mecanismo de desgaste, lo que en ocasiones implica una influencia catastrófica en la vida útil del elemento o máquina.

Para el análisis de cada proceso de desgaste debe de hacerse un análisis de sistema donde se plasmen las condiciones concretas de trabajo (por ejemplo, carga, temperatura, velocidad, etc.), así como del desgaste específico, su intensidad y forma del coeficiente de fricción. Es conveniente que el sistema sea tratado matemáticamente mediante el uso de técnicas de cómputo.

Es de suma importancia la caracterización de las capas superficiales (geometría, estructura y propiedades mecánicas), así como la forma de contacto entre ellas y la acción del medio ambiente y los procesos térmicos en el sistema [4].

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

[1] Robert B. Corbett, Rolls for the metalworking industries, Iron and Steel Society, Warrendale Pensilvania, Estados Unidos de America, 1990.

[2] Bharat Bhushan, Introduction to tribology, John Wiley and sons Inc., Nueva York, Estados Unidos de America, 2002.

[3] John A. Schey, Tribology in metalworking, Friction, lubrication and wear, American Society for metals, Ohio, Estados Unidos de America, 1984.

[4] Francisco Martinez Pérez, La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento, editorial Limusa, México D.F, 1996.

CAPITULO 2

FRICCION, LUBRICACION Y DESGASTE.

2.1 FRICCION.

La palabra fricción viene del verbo latín *fricare* que tiene como significado frotar. No existe un acuerdo universal de lo que verdaderamente causa fricción, sin embargo se sabe que ésta es debida a una serie de factores que probablemente actúan juntos pero aparecen en distintas proporciones y bajo diferentes circunstancias; uno de estos factores y quizás el mas significativo es la rugosidad. La fricción se puede definir como la resistencia al movimiento relativo de un cuerpo sobre otro, bajo una carga normal, los cuerpos en cuestión puede ser un gas y un sólido (fricción aerodinámica), o un líquido y un sólido (fricción líquida) o dos cuerpos sólidos (fricción sólida) [1].

El artista-científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo las leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana. También, fue el primero en introducir el concepto de coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas. Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia. Al surgir la Revolución Industrial, el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo veinte y derivado del enorme crecimiento industrial, se ha generado un importante análisis de los efectos que produce el fenómeno de fricción. En muchos casos se desea tener valores bajos de fricción como por ejemplo en cojinetes, engranes y en algunas operaciones de procesamiento de materiales; pero algunas otras veces lo que se necesita son valores altos de fricción como sería en frenos, embragues y superficies de rodamiento; en todos estos

casos es necesario tener valores de fricción para que el diseño de estos componentes tenga un funcionamiento eficiente y sean seguros [2].

La fricción es comúnmente representada por el coeficiente de fricción para el cual se utilizan los símbolos μ o el factor cortante de fricción m . El coeficiente de fricción es la relación que existe entre la fuerza de fricción, F , y la carga, N [1].

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

La ley de fricción de Coulomb propone que el esfuerzo cortante τ es proporcional a la presión p entre la pieza de trabajo y la herramienta de deformación. τ y p ; siendo el coeficiente de fricción la relación entre p y τ .

$$\tau = m p \quad (2.2)$$

Considerando que la fricción es constante el esfuerzo cortante es proporcional al esfuerzo de cedencia del material σ_0 [1].

$$\tau = m \sigma_0 / \sqrt{3} \quad (2.3)$$

La laminación en caliente es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos que giran en sentidos opuestos. Actualmente es muy complicado medir el coeficiente de fricción de manera directa durante el proceso de laminación en caliente. En vista de esta dificultad, se han desarrollado métodos matemáticos para predecir o estimar este coeficiente en condiciones normales de operación, sin que a la fecha se tengan datos comprobados sobre un modelo que cumpla con los requerimientos que la industria demanda [3].

2.1.1 Nomenclatura de la fricción.

Términos como fricción estática, coeficiente de fricción cinético, comportamiento adhesivo-deslizante y fricción lubricada, son comúnmente usados en la tribología.

FRICCION ESTATICA. Este término fue originalmente definido por Amontons en 1675. Según la norma ASTM G40 el coeficiente de fricción estático está definido como la relación adimensional de la fuerza de fricción y la fuerza normal de presión entre dos cuerpos [4]. El coeficiente de fricción estático es definido como aquel correspondiente a la máxima fuerza que tiene que ser vencida para iniciar un movimiento macroscópico entre dos cuerpos. Amontons estableció que en un plano de deslizamiento inclinado, este coeficiente es igual a la tangente del ángulo de inclinación del plano. Si se monitorea la fuerza de fricción durante una prueba de deslizamiento en un plano inclinado graficándose deslizamiento contra tiempo se obtiene una curva similar a la que se muestra en la Figura 2.1.

Las fuerzas que actúan durante el deslizamiento del objeto en la Figura 2.1 se pueden detectar mediante sensores. Se observa un pico F' que es la fuerza necesaria para iniciar la prueba, esta fuerza es utilizada para calcular el coeficiente de fricción estático.

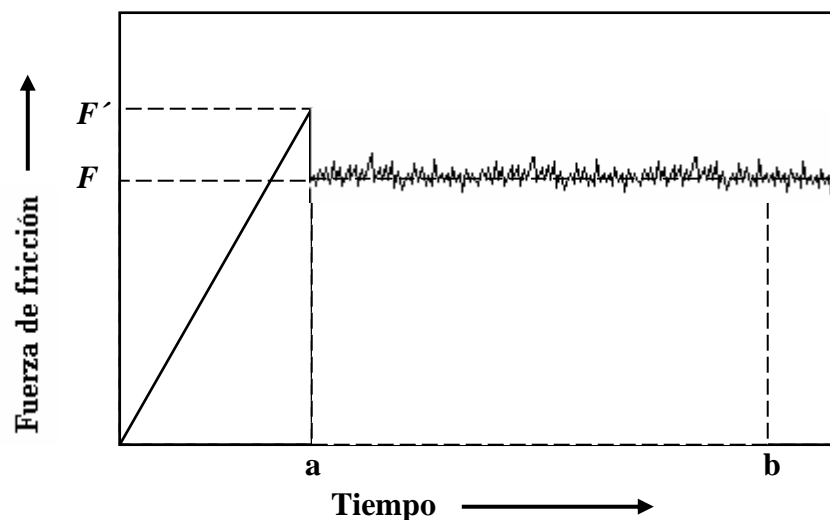


Figura 2.1 Mediciones de la fuerza de fricción que permanece constante con el tiempo [1].

FRICCION CINETICA. En la Figura 2.1 se podrá observar que la fuerza de fricción estática F tiene muchas variaciones, lo que causa problemas para tomar un valor de esta fuerza para estimar el coeficiente de fricción, pero esta curva puede cambiar también con incrementos o decrementos constantes como se puede ver en la Figura 2.2 [1].

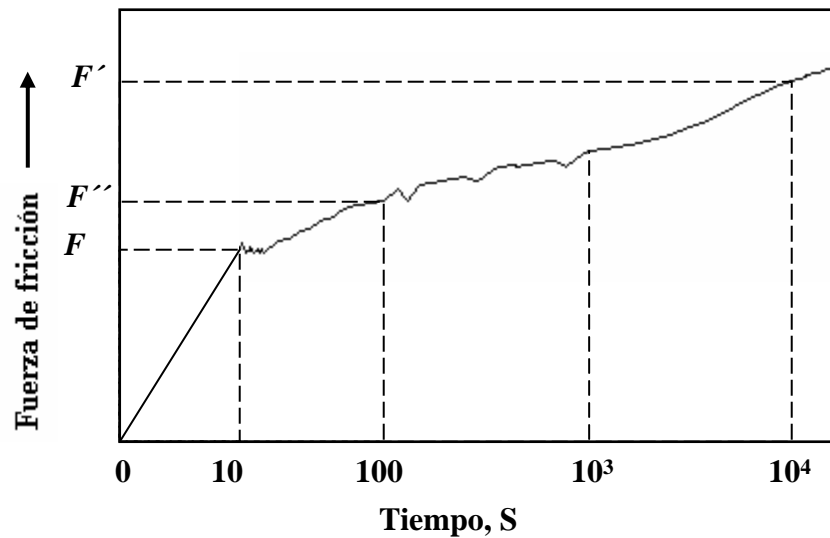


Figura 2.2 Mediciones de la fuerza de fricción que varía con el tiempo [1].

COMPORTAMIENTO ADHESIVO - DESLIZANTE. El estándar ASTM G40 define al comportamiento adhesivo-deslizante como una ligera oscilación que normalmente está asociada con el decremento del coeficiente de fricción a partir del incremento de la velocidad relativa [4]. En términos más simples, el comportamiento adhesivo-deslizante es la interrupción del movimiento que se presenta algunas veces cuando un cuerpo se desliza sobre otro. Tal movimiento se puede observar en la Figura 2.3. Una forma de relacionar el coeficiente de fricción en un sistema que presente este comportamiento es calcular los coeficientes máximos y mínimos utilizando las F' y F que se muestran en la Figura 2.3. F'' podría ser utilizada para estimar el coeficiente estático de fricción.

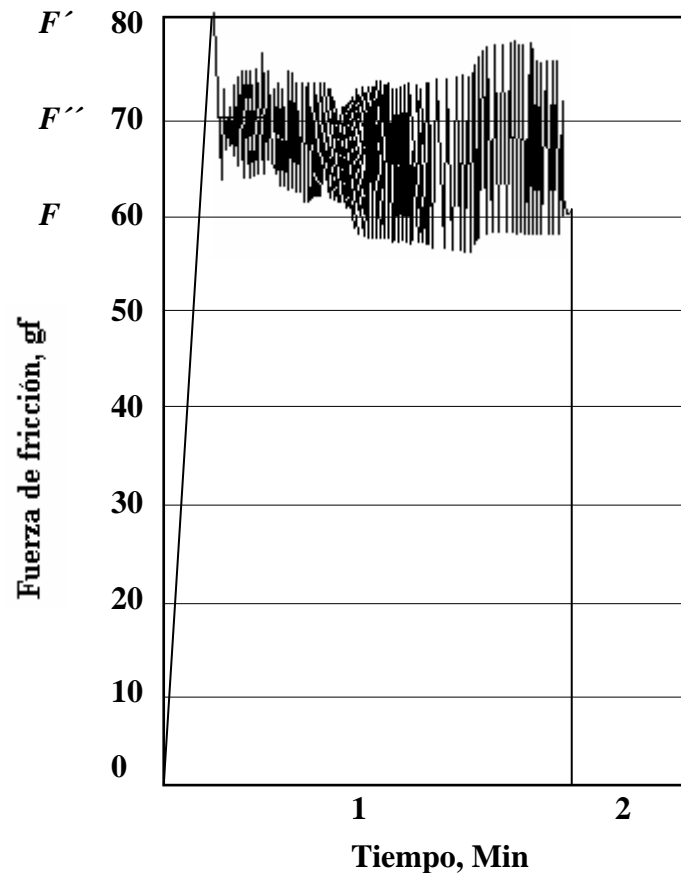


Figura 2.3 Mediciones de la fuerza de fricción para un sistema con comportamiento adhesivo – deslizante [1].

FRICCION LUBRICADA. Si los cuerpos en cuestión se encuentran completamente separados por una película de lubricante (aceite, agua, gas, emulsión, etc.) el coeficiente de fricción del sistema se ve afectado directamente por el fluido. Cuando están presentes condiciones de lubricación frontera (la cual se describe más adelante), las superficies están parcialmente en contacto y el coeficiente de fricción del sistema está en función de las propiedades tanto del lubricante como de las superficies. Cuando se presentan condiciones secas de lubricación en un sistema, el coeficiente de fricción está relacionado principalmente con las propiedades de lubricantes que están presentes, ya sean óxidos en la superficie o algún lubricante sólido como serían el grafito o el politetrafluoretileno (teflón). Cuando gobiernan las condiciones hidrodinámicas de lubricación en un sistema, el coeficiente de fricción está en función de la viscosidad de lubricante, la fuerza de presión a la que se somete durante el proceso y la velocidad relativa.

2.1.2 Pruebas estándar de fricción.

Un gran número de organizaciones han desarrollado pruebas estándar para medir coeficientes de fricción. Algunas pruebas que han sido estandarizadas por la ASTM están dirigidas hacia algunas aplicaciones en particular, sin embargo, no existe un sistema para realizar ensayos de fricción a altas temperaturas para procesos de laminación en caliente [1].

2.2 LUBRICACION

2.2.1 Los lubricantes y sus características.

Muchas de las diferentes ramas que constituyen el campo de desarrollo y aplicación de los materiales lubricantes, son por si solas especialidades cuyo estudio resulta complejo y extenso, por lo que se ofrecerá una síntesis de los principales temas al respecto.

Son muy diversos los tipos de materiales que pueden utilizarse como lubricantes, es por ello que de forma general se agrupan, de acuerdo con su estado físico de la siguiente manera:

Lubricantes sólidos

Lubricantes semisólidos

Lubricantes líquidos

Lubricantes gaseosos

De esta clasificación los lubricantes de mayor aplicación en la industria son los líquidos, siguiéndole en orden de importancia los semisólidos, los sólidos y por último, los gaseosos.

La función principal de los lubricantes es la reducción de la fuerza de fricción o prevención del desgaste de las piezas que forman pares de fricción. Con la reducción de desgaste y fricción, el lubricante debe evacuar el calor de la zona de fricción, proteger las superficies lubricadas de corrosión, reducir o prevenir la formación de suciedad sobre la superficie de las piezas, así como en algunos casos cumplir con funciones inherentes a la lubricación. Para determinar la capacidad de los lubricantes y cumplir las funciones referidas, es necesario conocer sus principales propiedades entre ellas:

Viscosidad, antidesgaste, densidad, propiedades térmicas, dilatación volumétrica, estabilidad, formación de espuma, emulsibilidad, corrosividad, acción sobre materiales no metálicos, toxicidad.

Propiedades de viscosidad. Es el índice físico más importante de los lubricantes, ella determina la capacidad portadora (tolerar cargas) de la película de lubricante en los pares de fricción de los mecanismos.

Propiedades antidesgaste. Expresa la influencia de los lubricantes en los diferentes tipos de desgaste, como por ejemplo corrosivo, fatiga, por picadura y otros. El carácter cualitativo y cuantitativo de tal influencia puede no ser siempre igual, de esta forma los lubricantes con propiedades de extrema presión, en algunos casos pueden provocar un desgaste corrosivo acelerado y disminuir el tiempo de servicio. La efectividad de los lubricantes no sólo depende de sus propiedades específicas, sino también de la interacción del mismo con otros factores como son el coeficiente de fricción, las propiedades y geometrías de las superficies, entre otros.

Densidad. Está en función de la presión atmosférica y la temperatura del ambiente, como regla general, mientras mayor es la viscosidad, mayor es la densidad, la cual depende de la composición química de los lubricantes.

Propiedades térmicas. Determinan la eficiencia de evacuación de calor de las superficies que forman pares de fricción. El aumento de la conductividad térmica de los lubricantes mejora las propiedades lubricantes y refrigerantes. Esta propiedad debe de conocerse para los cálculos de las temperaturas en las zonas de contacto.

Dilatación volumétrica. Depende de la viscosidad y densidad del lubricante, con la disminución de la densidad aumenta el coeficiente de dilatación volumétrica, es por ello que los lubricantes poco viscosos tienen una mayor dilatación volumétrica en comparación con los más viscosos.

Estabilidad. Es la capacidad que tienen los lubricantes de conservar sus propiedades en condiciones de explotación y almacenamiento. La oxidación de los lubricantes constituye un proceso irreversible de envejecimiento del mismo, esto depende de las características del lubricante y los factores externos, como la temperatura. La estabilidad es uno de los índices más importantes ya que de ello depende la vida útil del lubricante.

Formación de espuma. La espuma en los lubricantes interfiere en sus propiedades ocasionando efectos perjudiciales, determinados entre otras causas por interrupción del bombeo adecuado del lubricante, aceleración de la oxidación, fallas en la película lubricante, rebase de los niveles de lubricante en los depósitos de los sistemas de lubricación, entre otras.

Emulsibilidad. Los lubricantes durante su explotación se ven expuestos con frecuencia a contaminarse con agua y pueden formar oleo-emulsiones muy estables, que resultan indeseables a causa de efectos tales como disminución de la viscosidad del fluido que empeora las condiciones de fricción, formación de herrumbre, acelera la degradación de lubricantes aditivados. Todos los lubricantes que son utilizados con agua deben de poseer buenas propiedades antiemulsionantes.

Corrosividad. Los lubricantes pueden ocasionar corrosión de las superficies cuando hay presencia de ácidos (producto de la oxidación de los lubricantes o provenientes de otras fuentes), de agua o de aditivos que pueden resultar agresivos a los metales. La corrosión sobre los metales ferrosos ocurre generalmente por la presencia de agua ácida en el aceite, formada por el deterioro de los lubricantes así como por la acción de algunos tipos de aditivos, aunados al incremento de temperatura.

Acción sobre materiales no metálicos. Los lubricantes que contienen sustancias químicamente activas, en particular azufre y cloro, pueden ocasionar una acción perjudicial sobre las juntas y sellos de hules o polímeros y cuero, ya que dichos elementos en condiciones de alta temperatura ocasionan la solidificación y fragilidad de los mismos, terminando por deteriorarlos.

Toxicidad. Los lubricantes no deben de ser nocivos para la salud del hombre, ni tener olores desagradables. Dichos requerimientos son especialmente necesarios para los lubricantes que contienen aditivos.

2.2.2 Los aditivos y sus características.

El desgaste mecánico se origina por los contactos intermitentes entre las microrugosidades de las superficies sometidas a fricción, el que con, mayor o menor intensidad es inevitable en la práctica, por esta causa ocurre el desprendimiento progresivo de partículas que salen de la zona de fricción con la consecuente pérdida de masa de la pieza. El retardo de este tipo de desgaste se logra eficientemente con lubricantes que aseguren una adecuada capa de absorción en las condiciones de lubricación límite.

El desgaste por fatiga surge debido a la acción de tensiones cíclicas de contacto en las capas superficiales del metal; estos esfuerzos pueden dar como resultado grietas provocadas por fatiga y finalmente la aparición de picaduras y escamas. Con el uso de materiales adecuados y aceites lubricantes es posible reducir el desgaste por fatiga.

Los aditivos que actúan sobre el régimen de fricción, mejorando las propiedades del lubricante, por el carácter de su acción, pueden dividirse en tres tipos principales:

Antifricción, antidesgaste, extrema presión.

Los requisitos principales que se exigen de este tipo de aditivos son:

- a) La antifricción debe de reducir y estabilizar la fricción.
- b) Los antidesgastes deben reducir el desgaste progresivo ante cargas moderadas.
- c) La extrema presión debe evitar el desgarramiento de las superficies de fricción.

Aditivos antifricción. Como aditivos que disminuyen la fricción se emplean sustancias tensoactivas, tales como ácidos grasos, ácidos orgánicos, alcoholes, así como aminas y sus derivados, entre los más utilizados. Los jabones de los ácidos grasos (estearato de aluminio, de magnesio y otros) se emplean como estabilizadores de la fricción. Estos aditivos actúan según el mecanismo de absorción física, como resultado de la acción de los grupos polares de las moléculas, con los centros activos de las superficies metálicas. Las moléculas se orientan paralelas unas a otras en el campo de fuerza de las superficies. Después de ser ocupados todos los centros activos de la superficie metálica, continua la formación de capas mediante la atracción de los extremos libres de las moléculas de la capa primaria, por los radicales alquílicos de las moléculas libres, así hasta formar una capa multimolecular. A mayores cargas y temperaturas las películas se

absorben suprimiéndose así la protección de las superficies. Si se restablecen las condiciones de carga y temperaturas, las películas de absorción se regeneran nuevamente sobre las superficies metálicas.

Aditivos antidesgaste. Estos aditivos pueden disminuir el desgaste de las superficies en los casos que el desgaste tenga naturaleza químico-corrosiva y en que el desgaste surja como resultado del contacto mecánico. En el primer caso los aditivos más efectivos son los denominados detergentes, tales como los sulfonatos, alquilsalicilatos, alquilfenolatos de calcio. En la reducción del desgaste mecánico ante cargas y temperaturas moderadas, se utilizan en calidad de aditivos antidesgaste, compuestos orgánicos sulfurados y fosfatados. Los compuestos más frecuentemente utilizados son los ditiofosfatos y fosfonatos de Zn, Ca y Ba, los que además de poseer propiedades antidesgaste, también actúan como inhibidores de la oxidación y como anticorrosivos. Estos aditivos actúan según el mecanismo de absorción química, el cual se manifiesta a altas temperaturas, cuando las películas de absorción física no son efectivas. En condiciones de elevadas temperaturas con cargas de choque y fricción por deslizamiento, el mecanismo de absorción química se combina con el de reacción química, para evitar o reducir el desgarramiento enmarcado con las condiciones de extrema presión.

Aditivos de extrema presión. Estos aditivos se emplean en donde los aditivos antidesgaste no son suficientes para evitar el contacto de metales entre los pares de fricción. Entre los principales aditivos de este tipo, están los compuestos orgánicos de azufre, fósforo y cloro, además de algunas combinaciones con estos elementos.

Las condiciones de formación de las películas de extrema presión, no han sido suficientemente estudiadas. Se considera que durante el proceso de absorción química, las partículas se forman a temperaturas moderadas, sobre todo en la superficie metálica, al elevarse la temperatura bajo la acción del calor de la fricción en las zonas de contacto, se descomponen los aditivos dando lugar a sustancias simples tales como sulfhídrico, fosfinas y otras que interactúan con el metal formando películas más profundas y resistentes de sulfuros, fosfatos y fosfuros de metales.

2.2.3 Características y funciones de los lubricantes utilizados en el formado de metales.

En el formado de metales, la fricción es controlada por el uso apropiado de lubricantes, esto debe tener ciertas características, también deben desempeñar varias funciones importantes durante el proceso, sus características y funciones son [6]:

- Reducir la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Esto se alcanza utilizando un lubricante con alta lubricación.
- Actuar como un agente que separa la herramienta de la pieza de trabajo previniendo que las piezas lleguen a pegarse.
- Poseer buenas propiedades aislantes, especialmente en el trabajo en caliente, así como reducir las pérdidas de calor entre la pieza de trabajo y la herramienta.
- Debe ser inerte para prevenir o minimizar algunas reacciones con la herramienta y la pieza de trabajo.
- No debe ser abrasivo y también debe prevenir la erosión y el desgaste en la superficie de la herramienta.
- Debe estar libre de contaminantes y componentes dañinos y no debe producir gases peligrosos.
- Debe ser de fácil aplicación, asimismo deben ser fáciles de remover.
- Debe estar disponible comercialmente y a un costo razonable.

2.2.4 Lubricación de elementos mecánicos.

Cuando se habla de lubricación, realmente se piensa que tal efecto tiene como objetivo principal disminuir significativamente el coeficiente de fricción y por consiguiente menor consumo de energía y menor desgaste de los cuerpos en contacto. Otros de los beneficios que se obtienen con un sistema bien lubricado son:

- 1.- Eliminación o disminución del proceso de corrosión.
- 2.- Refrigeración de las partes móviles generadoras de calor.
- 3.- Amortiguamiento de cargas dinámicas.
- 4.- Derivación, separación y filtración de los productos de desgaste.

La disminución del valor del coeficiente de fricción se realiza prácticamente por el cambio de fricción existente entre las dos superficies de elementos en contacto. Adicionalmente el lubricante llena los espacios y campos vacíos entre las rugosidades superficiales de los elementos aumentando así significativamente el área real de contacto, disminuyendo las presiones reales aproximándolas a las presiones nominales.

Todos los procesos y fenómenos mencionados dependen prácticamente del grosor de la capa lubricante que debe de separar las superficies eliminando el contacto directo entre ellas.

En el formado de metales, la fluencia del material es causada por la fuerza entre la interfase herramienta – material. Hay tres tipos básicos de lubricación que gobiernan las condiciones de fricción en el formado de metales, como se puede ver en la Figura 2.4 [1].

1.- Bajo condiciones secas, no existe lubricación en la interfase, solo las capas de óxido se encuentran presentes entre la herramienta y la pieza de trabajo. En este caso la fricción es alta, estas condiciones de fricción son prácticas en algunos casos de operaciones de formado como lo son el laminado en caliente de placas y planchones de acero y en procesos de extrusión de aleaciones de aluminio, Figura 2.4 (b).

2.- Las condiciones hidrodinámicas existen cuando una capa de lubricación se encuentra presente entre la herramienta y la pieza de trabajo. En este caso las condiciones de fricción están gobernadas por la viscosidad del lubricante y por la velocidad relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo. Las viscosidades de muchos lubricantes se ven afectadas disminuyendo sus valores debido al incremento de la temperatura. Las condiciones hidrodinámicas sólo existen dentro de un cierto margen de velocidades, donde la temperatura en la interfase es relativamente baja, Figura 2.4(c).

3.- La lubricación frontera es la más común en los procesos de formado de metales. El incremento de temperatura en la interfase, aunado a las altas presiones en el proceso de formado no permiten que se den las condiciones de lubricaciones hidrodinámicas. La lubricación frontera, por otro lado, no se presta para un análisis confiable. Por consiguiente, mucho del conocimiento en este tipo de condiciones de lubricación en el formado de metales es empírico, Figura 2.4 (d).

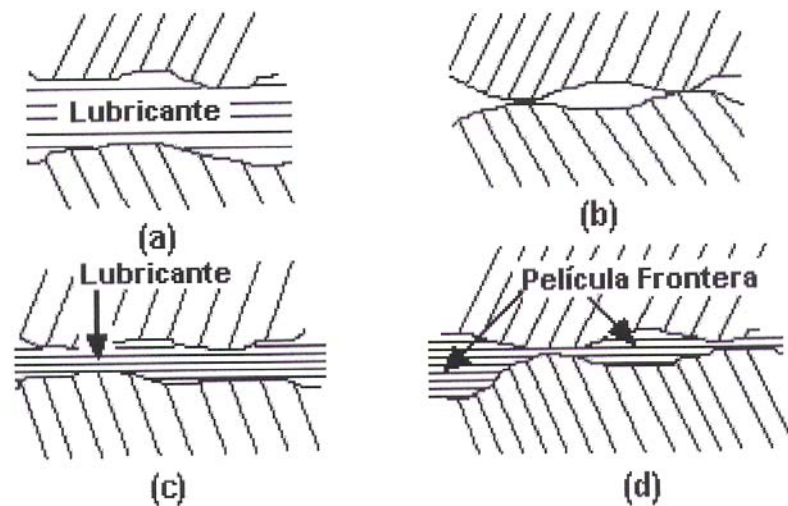


Figura 2.4 Tipos básicos de lubricación (a) Capa gruesa de lubricante (b) Condiciones secas (c) Condiciones hidrodinámicas (d) Lubricación frontera [1].

Como se muestra en la Figura 2.5, durante el proceso de laminación gobiernan las condiciones hidrodinámicas de lubricación, esto es debido a que las superficies de los rodillos y de la lámina no son perfectamente lisas ya que tienen irregularidades en forma de picos (o crestas) y valles (cavidades). El lubricante pasa desde la zona de entrada hasta la salida a través de un laberinto de canales creado por esas irregularidades. Como la lámina está siendo deformada las crestas están siendo aplastadas y el lubricante se queda atrapado y se presuriza al disminuir el volumen de la cavidad.

A bajas velocidades de laminación, el exceso de lubricante en la cavidad fluye de nuevo a la zona de entrada, mientras que en condiciones de velocidades altas la mayor parte de lubricante permanece atrapado en las cavidades. El lubricante atrapado se presuriza causando una separación parcial entre los rodillos y la lámina. En condiciones de velocidades bajas de laminado la presión es transmitida de los rodillos a la lámina a través del contacto metal – metal.

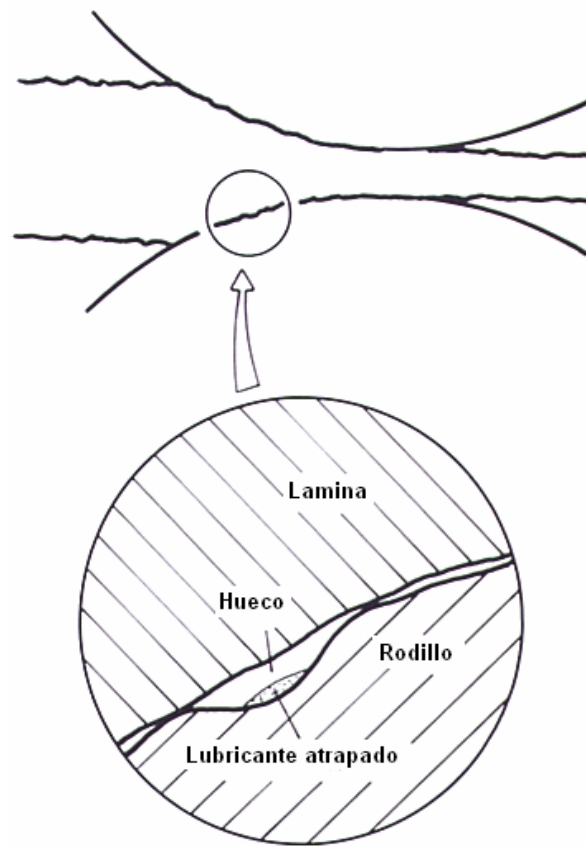


Figura 2.5 Lubricación en la zona de entrada de la laminación [1].

A altas velocidades la presión es transmitida en su mayor parte por el lubricante. Como la presión transmitida a través del contacto metal – metal es menor a altas velocidades, la fricción disminuye.

Cuando las condiciones se alcanzan para tener una lubricación hidrodinámica la fricción toma su valor mínimo (Figura 2.6). Por lo tanto, con el incremento en la velocidad de laminación, altas velocidades en los esfuerzos cortantes son creadas en el líquido, donde el esfuerzo cortante es proporcional a la velocidad de deformación cortante (Figura 2.7). Los valores de fricción son mucho menores cuando existe lubricación hidrodinámica que cuando existe un contacto metal – metal.

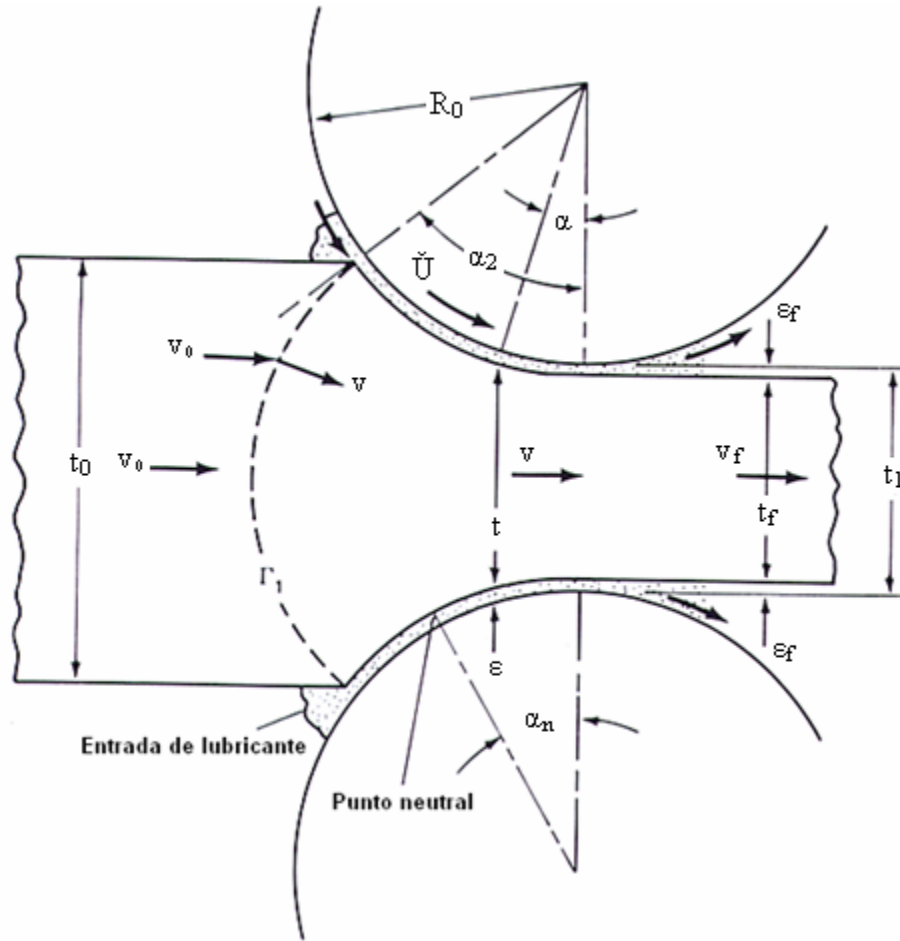


Figura 2.6 Lubricación hidrodinámica durante la laminación [1].

El parámetro crítico en este caso es el espesor de la capa hidroplastodinámica, h_1 :

$$h_1 = \frac{6\eta v}{2k \tan(\theta)} \quad (2.4)$$

Donde η es la viscosidad del lubricante, v la velocidad relativa de la superficie, $2k$ es la tensión de fluencia del material siendo deformado y θ es el ángulo de convergencia de las superficies, en la Figura 2.6, conforme las condiciones de lubricación cambian a lo largo del arco de contacto, resulta en la modificación de la forma y magnitud de la colina de fricción, así como la variación de μ [1].

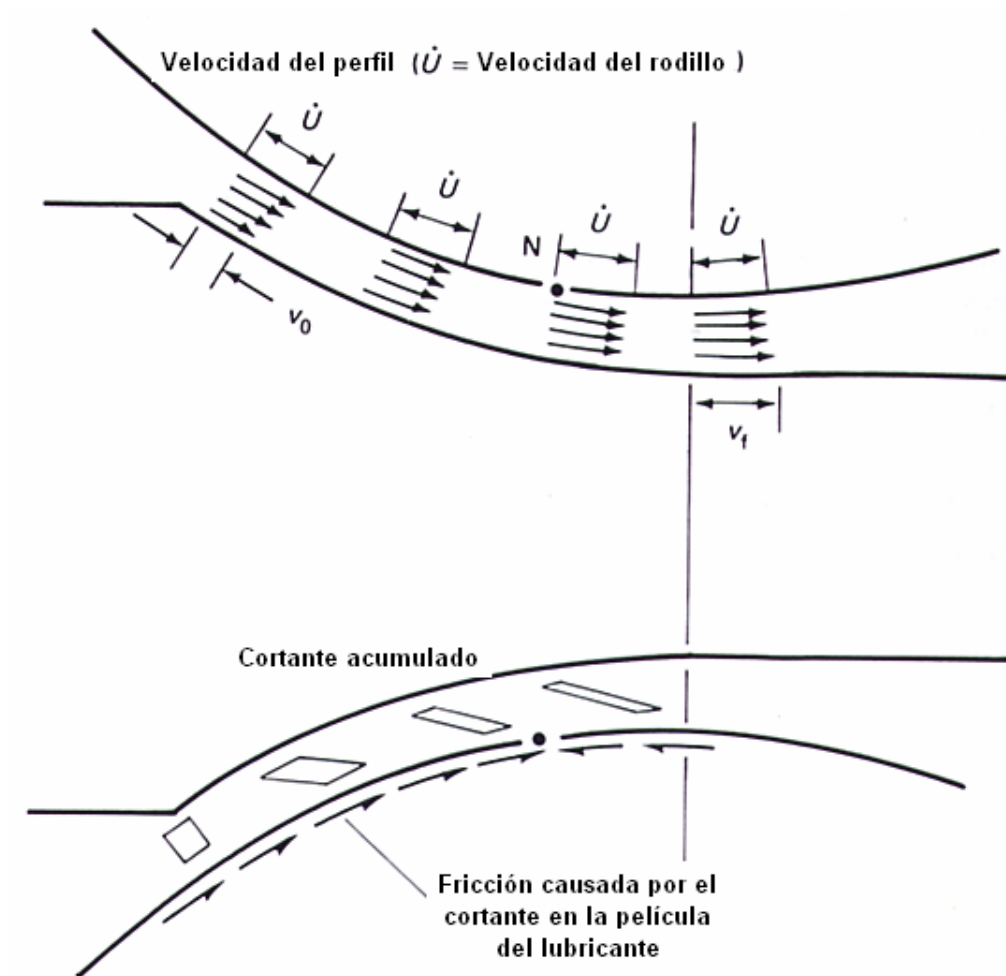


Figura 2.7 Esfuerzos cortantes en la capa lubricante [1].

2.3 DESGASTE.

El desgaste se define como el daño ocasionado a una superficie como resultado de un movimiento relativo entre dos superficies. Este daño puede ser en forma de pérdida de material, formación de microgrietas o también en términos de deformación plástica. En general, las tres variables más relevantes que afectan al desgaste son el área de contacto, la fuerza de unión interfacial y la dinámica de los materiales. Existen varios tipos de desgaste diferenciados, aunque todavía no hay un consenso en cuanto a la terminología utilizada.

2.3.1 Desgaste adhesivo.

Ocurre cuando dos superficies lisas entran en contacto deslizando la una respecto la otra, de modo que pequeños fragmentos de material son arrancados de una superficie y adheridos a la otra. Más tarde estos fragmentos pueden liberarse y ser transferidos a la superficie original a la cual pertenecen, o también pueden convertirse en partículas libres.

Este tipo de desgaste se genera debido a las importantes fuerzas de adhesión que aparecen cuando dos superficies entran en contacto. Durante el deslizamiento, se puede formar un contacto entre las dos superficies y existe una pequeña probabilidad de que cuando la unión se rompa, lo haga en una interfase diferente a la original, de modo que un elemento transferido se habrá formado. El aspecto de la superficie desgastada será de ciertas ralladuras irregulares y superficiales [7].

2.3.2 Desgaste abrasivo.

La abrasión se da cuando una superficie dura, o una superficie blanda con partículas duras, desliza sobre una superficie más blanda, causando una serie de cavidades y desplazando material de estas cavidades en forma de partículas generalmente libres. El desgaste abrasivo tiende a formar ralladuras profundas [7].

2.3.3 Desgaste corrosivo.

Cuando las superficies en contacto se encuentran en un medio corrosivo, los productos de la corrosión formarán una capa encima de las superficies que frenará o inhibirá la corrosión. Sin embargo, el continuo deslizamiento podría arrancar esta película, continuando así el ataque corrosivo. Uno de los principales tipos de desgaste corrosivo es el producido por la simple oxidación de las capas superficiales del material [7].

2.3.4 Desgaste superficial.

Se observa durante el deslizamiento o rodamiento repetitivo a lo largo de una huella. La exposición a ciclos de carga y descarga de las superficies puede inducir la formación de grietas superficiales o justo por debajo de ella, que podrían llegar a romper la superficie en forma de grandes fragmentos, dejando grandes marcas en la superficie. Este desgaste aumenta cuando el deslizamiento es del tipo vaivén [7].

2.3.5 Otros tipos de desgaste.

Existen también otras formas de desgaste menos extendidas, y son las siguientes:

Erosión. Proceso por el cual una partícula transportada por un medio fluido impacta sobre una superficie y arranca material de ella. Existen dos tipos de erosión bien diferenciados:

1. Erosión a baja velocidad. Cuando partículas pequeñas chocan contra una superficie y se deslizan a lo largo de ella una cierta distancia hasta que se separan. Las velocidades son del orden de 5 a 200 m/seg.

2. Erosión a alta velocidad. Cuando las partículas que impactan se mueven a gran velocidad, al chocar producen grietas que crecerán para finalmente liberar partículas. En un material dúctil, al principio no habrá desgaste, pero seguidamente se dará un desgaste por fatiga superficial. En un material frágil, la fractura superficial se dará en menos tiempo.

3. Erosión-Cavitación. Una superficie es recubierta por un líquido en compresión hidrostática. En este líquido en tensión se pueden formar burbujas, de aire simplemente, de modo que el líquido se encontrará otra vez en compresión, presionando las burbujas, que se pueden dirigir contra la superficie del sólido, dañándola [8].

2.3.6 Pruebas de desgaste.

Actualmente existen en el mercado un gran número de máquinas de laboratorio para ensayos de desgaste, aunque la mayoría de ellas se basa en el principio del método perno sobre disco (pin on disk), el cual es un método muy adecuado para determinar la resistencia al desgaste entre los metales.

Para la prueba de desgaste con el método perno sobre disco se necesitan dos probetas fabricadas con los materiales a ser estudiados. El primero es un perno cuyo tamaño es muy reducido, el cual es colocado perpendicularmente a la otra pieza, la cual generalmente es un disco. La máquina de pruebas causa que el perno o el disco giren entre sí; como consecuencia de ello, se forma un camino de desgaste en el disco. El plano del disco puede ser orientado vertical u horizontalmente y los resultados de desgaste pueden diferir según la orientación del disco.

La probeta en forma de perno se presiona sobre el disco a una carga específica, la cual se encuentra usualmente sujeta a un brazo posicionador con contrapesos. Otros métodos de carga que se han utilizado son hidráulicos o neumáticos. Los resultados de desgaste pueden diferir según el tipo de carga. Los reportes de desgaste se realizan en términos de pérdida de volumen en milímetros cúbicos por el perno y el disco separadamente. Cuando dos materiales son probados, se recomienda que el ensayo sea realizado en ambas posiciones para ambos materiales.

En términos generales el equipo consiste en un posicionador de un perno con un extremo esférico sobre un disco, el cual gira por la acción de un motor a unas determinadas revoluciones por minuto. El perno se encuentra localizado a un radio R del centro del disco. El disco puede estar dotado con celdas de carga, las cuales pueden servir para determinar el coeficiente de rozamiento. Un motor con velocidad variable,

capaz de mantener la velocidad seleccionada constante (con una variación de $\pm 1\%$ de la máxima velocidad del motor) es requerido para la máquina. El motor debe estar montado de tal manera que las vibraciones no afecten las pruebas. Las velocidades de rotación más usadas se encuentran en el rango de 0.3 a 3 rad/s (60 a 600 rpm). La máquina debe estar equipada con un contador de revoluciones, y preferiblemente debe tener la capacidad de apagar el equipo después de sobrepasar un determinado número de revoluciones. La maquina PIN ON DISK debe de contar con instrumentos para obtener mediciones lineales de desgaste; estos instrumentos deben tener una sensibilidad de 1.0 μm por lo menos. Cualquier balanza utilizada para medir la pérdida de masa en las probetas deberá tener una sensibilidad de por lo menos 0.1 mg. En casos de poco desgaste se necesitan mayores sensibilidades.

Este método puede aplicarse a una gran variedad de materiales. El único requisito es que las probetas tengan dimensiones específicas para que puedan resistir las cargas aplicadas durante el ensayo. Los materiales a ser probados deberán tener una detallada descripción en cuanto a dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos y dureza.

El perno generalmente es un cilindro o una pequeña esfera, los cuales deben tener un diámetro de 2 a 10 mm. Los discos deberán tener un diámetro entre 30 y 100 mm, con un espesor que varía entre 2 y 10 mm. El acabado superficial deberá presentar una máxima rugosidad de 0.8 μm [9].

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] P. Crook y H.N. Farmer, ASM Handbook Vol 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM, 1992.
- [2]] D. Dawson, History of Tribology, Oxford University, Oxford, Estados Unidos de America, 1979.
- [3] J. F. Mojica y J. L. Garza, Int. Conf. Steel Rolling. Sc. Techn. Flat Rolled Products, Iron Steel Inst.Tokio, Japón, 1980.
- [4] Annual Book of Standard of ASTM Standard, ASTM, Estándar Terminology Relating to Wear and Erosion.
- [5] Charles A. Bailey and Joseph S. Aaron S., The lubrication and wear, American Society for Metals, Estados Unidos de America, 1984.
- [6] John A. Schey, Tribology in metalworking, Friction, lubrication and wear, American Society for metals, Ohio, Estados Unidos de America, 1984.
- [7] Bharat Bhushan, Introduction to tribology, John Wiley and sons Inc., Nueva York, Estados Unidos de America , 2002.
- [8] A.D Sarkar, Desgaste de metales, Editorial Limusa, México D.F, 1990.
- [9]ASTM. G 99-90. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin on Disk Apparatus. ASTM. 1990.

CAPITULO 3

PRODUCCIÓN DE ACERO Y PRINCIPIOS DE LAMINACION.

3.1 INTRODUCCION.

La capacidad de producir acero es básica para el desarrollo de la potencia económica, política y militar. Un estudio de las estadísticas de la producción de acero en el siglo pasado revela que esto es cierto. La expansión hacia el oeste de Estados Unidos hubiera sido imposible sin el tonelaje de producción del acero necesario para la creación de un sistema eficiente de transportación por tierra [1].

La industria acerera mundial, especialmente en Norteamérica, entró en una crisis financiera severa durante los últimos años del siglo XX debido a una caída generalizada de precios del acero. Durante 1999 – 2003 varias empresas en el continente americano pasaron por procesos de quiebra, suspensión de pagos, reestructura financiera, cierres de capacidad y consolidación.

A nivel mundial, esto ocasionó un freno importante a las inversiones en modernización e incremento en capacidad, especialmente en los insumos básicos como mineral, coque, carbón, fierro esponja, chatarra, ferro-aleaciones, energéticos, entre otros. Otro factor que ha influido en esta crisis es el aumento de la energía eléctrica, el cual ha registrado un incremento de 66 por ciento en los últimos 5 años, en tanto que el precio del gas natural se elevó en 217 por ciento [2].

En forma creciente, las sociedades industriales modernas requieren métodos eficientes para convertir el combustible en energía, y para esto es esencial la maquinaria de acero. Actualmente se requieren cerca de dos toneladas de combustible para la manufactura de cada tonelada de acero laminado en caliente. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo para la producción de acero y se describe posteriormente cada una de las etapas del proceso [1].

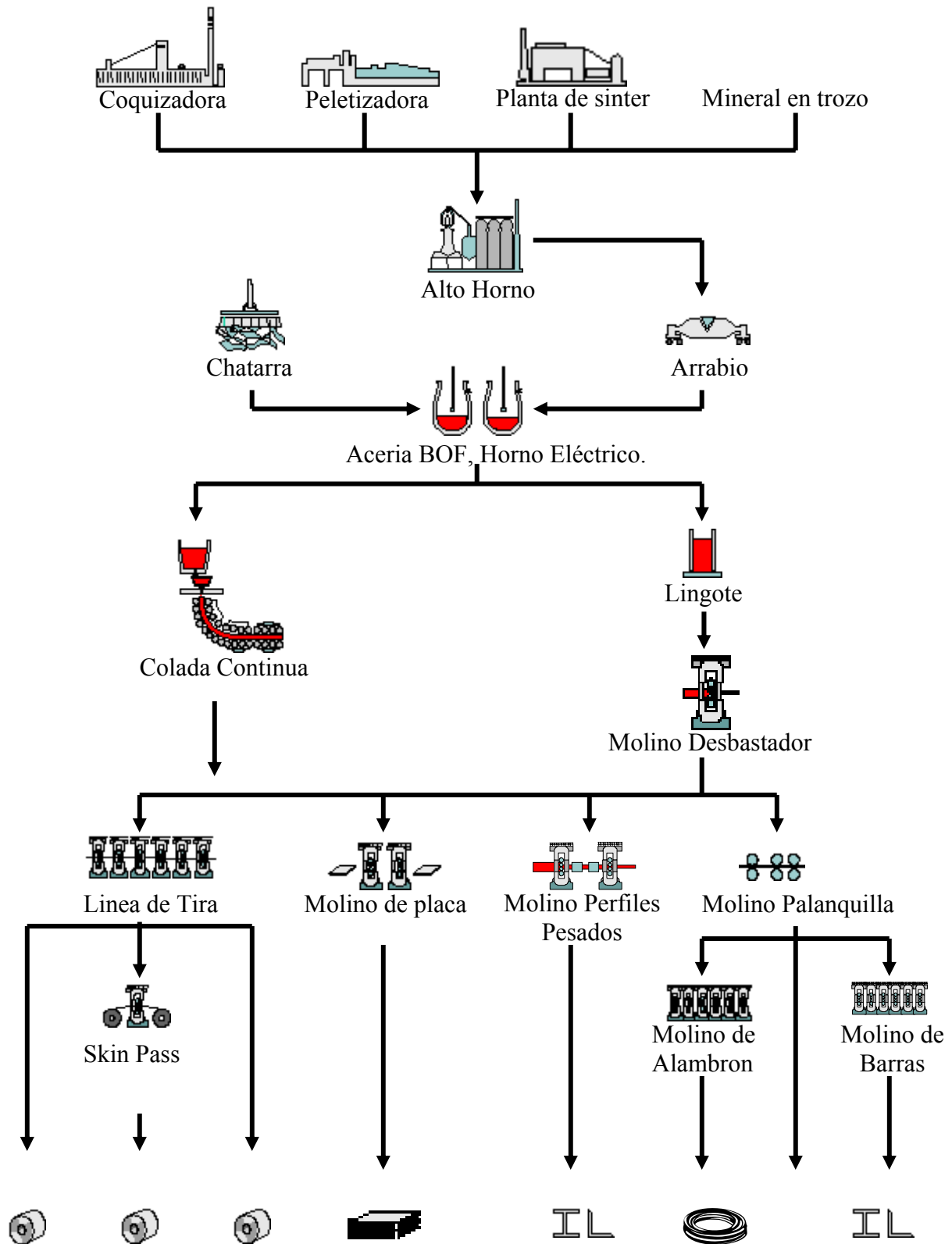


Figura 3.1.- Diagrama de flujo para producción de acero [3].

3.2 PROCESO PRIMARIO Y ACERIA.

La primer etapa para la producción de acero consiste en producir el arrabio, el cual se obtiene de un alto horno como lo muestra la Figura 3.1, algunas veces a esta etapa se le conoce como proceso primario. Las materias primas que se necesitan para producir una tonelada de arrabio son, en forma aproximada, dos toneladas de mineral (u otra fuente de hierro), casi una tonelada de coque, cerca de media tonelada de piedra caliza y tres y media toneladas de aire. Por tanto un alto horno produce cerca de una tonelada de producto principal por casi siete toneladas de material aportado. Las fuentes principales de hierro en la carga del alto horno son el mineral o los aglomerados como se puede ver en la Figura 3.1. Los aglomerados se hacen de partículas finas de minerales naturales, polvos de los gases de escape y concentrados de mineral. Los aglomerados están disponibles como sinterizado que se asemeja a pelotitas de escoria vitrificadas o perdigones, los cuales son partículas redondeadas de menos de tres centímetros de diámetro. El sinterizado se hace mezclando los finos portadores de hierro con coque de alta ceniza y partículas finas de fundente de caliza y el quemado cuidadoso de la mezcla. Los perdigones se hacen de partículas muy finas de concentrado de mineral de hierro, combustible, aglomerante (arcilla de bentonita) y agua. La mezcla se coloca en un tambor giratorio, donde se forman las pequeñas esferas. Entonces se queman para obtener la resistencia necesaria para evitar que se desmoronen cuando se colocan en el alto horno. Si los sólidos cargados en el alto horno se desmoronan, se puede compactar tanto que el soplo de aire se obstruye y disminuye la efectividad del horno.

En esencia, el alto horno es un cilindro de forma irregular que es alimentado con la materia prima sólida por la parte de arriba y se sopla aire enriquecido en el fondo. La escoria líquida y el metal se sangran del fondo del horno y los gases de escape y el polvo salen en la parte superior del horno. Los hornos operan en forma continua en periodos de 5 a 7 años y posteriormente se reconstruyen. Conforme los sólidos en la carga avanzan hacia abajo en el horno, se calientan y se expanden. Al mismo tiempo los gases se enfrían conforme ascienden a la parte superior del horno.

Como se puede ver en la Figura 3.1, la siguiente etapa para la producción de acero es la refinación, ya sea de arrabio o de chatarra de acero o por la refinación de una combinación de ambos materiales. El arrabio suministra con mucho la mayor parte de

acero producido, pero el acero de chatarra juega un papel vital en la producción de este metal. En el acero producido a partir de arrabio, el problema básico es oxidar las impurezas presentes, las cuales se remueven ya sea como gas o en la escoria. El oxígeno se suministra ya sea con un soplo de aire o como oxígeno puro o mediante óxidos.

Hoy en día se cree que un 5% del acero se sigue produciendo en hornos de hogar abierto, sin embargo este proceso tiende a desaparecer. Los convertidores básicos de oxígeno (BOF) representan en la actualidad el 65% de acero que se consume en el mundo, en tanto que el 35% restante se obtiene de hornos eléctricos. Estos últimos son adecuados en especial para laminadoras no integradas especializadas conocidas como minilaminadoras.

La siguiente etapa en la producción de acero es el proceso de colado el cual se puede realizar de dos maneras diferentes como se puede apreciar en la Figura 3.1, las cuales son el colado en molde y en colada continua.

El proceso de colado en molde es una práctica que se ha venido perdiendo conforme avanza la técnica de vaciado, esto se debe a que los costos necesarios para el laminado posterior al vaciado se incrementan considerablemente. En casos especiales en las que se desean fabricar perfiles con dimensiones relativamente grandes es recomendable utilizar la técnica de vaciado en molde, ya que el proceso de desbaste no incrementa el costo de producción.

El proceso de colada continua es una práctica que actualmente se utiliza en la mayor parte de las laminadoras de todo el mundo. Este proceso consiste en verter el material en un extremo de un molde de metal abierto en ambos extremos, enfriarlo con rapidez y extraer el producto sólido en un largo continuo por el otro extremo. El principio de colado continuo se lleva a cabo en varias formas que difieren en detalles, en general se puede decir que el metal fluye en una trayectoria tortuosa en el horno, en la parte inferior del molde está encamisado con agua y el metal solidifica con rapidez. Algunos sistemas emplean moldes vibratorios o reciprocantes para evitar que se pegue el colado y su geometría es curvada para que el colado se enfile en posición horizontal donde pasa a través de rodillos que lo enderezan. Por último, el producto se corta a las longitudes deseadas con sierra o soplete.

El colado continuo se realiza para varios propósitos. Es adecuado en particular para cualesquier forma de sección transversal uniforme como son redondos, cuadrados, rectangulares, hexagonal, estriada, escalonada y muchas otras formas. El colado continuo ofrece varias ventajas. Su rendimiento en perfiles laminados es 10% o más que el producido a partir de lingotes. Una cantidad apreciable en el extremo de cada lingote debe de cortarse y devolverse al horno debido a su porosidad, falta de solidez y contenido de impurezas. Este desperdicio se elimina prácticamente por la uniformidad de los colados continuos. Por supuesto, en el colado continuo puede presentarse un centro hueco, pero permanece puro y se cierra al soldarse después de cuatro pasos por rodillos. Las propiedades físicas y los acabados de superficie son comparables con los obtenidos en otros procesos en molde de metal. El colado continuo en forma esencial es automático, y es bajo en costo unitario de mano de obra, pero el costo del equipo es alto y el consumo de energía es considerablemente alto comparado con los colados en molde individual [4].

3.3 CLASIFICACION DEL PROCESO DE LAMINACION.

La laminación de los metales como proceso de conformación se divide en varios tipos y etapas de acuerdo a determinadas circunstancias o condiciones, siendo las principales:

- a) La temperatura del acero
- b) La forma geométrica de la barra (se nombra barra a la pieza de acero que está siendo laminada independientemente de la forma o tamaño que tenga).
- c) La etapa del proceso.

a) La temperatura del acero. La laminación de acero se divide en laminación en caliente y en frío. La laminación en caliente se define como una deformación en condiciones tales de temperatura y velocidad de deformación que se producen simultáneamente la deformación y la restauración del grano. Por el contrario, la laminación en frío es realizada en condiciones tales que no es posible que se produzcan eficazmente los procesos de restauración. Generalmente la laminación en caliente de acero se efectúa entre 900 °C y 1300 °C, mientras que la laminación en frío se efectúa entre la temperatura ambiente y los 200 °C.

Los procesos que se muestran en la Figura 3.1, son de laminación en caliente, la laminación en frío parte del suministro de lámina producida en caliente que se procesa en la línea de tira.

b) La forma geométrica de la barra. Respecto a la forma geométrica que mantiene la barra durante el proceso, la laminación se divide en plana y no plana. Laminación plana es cuando la barra mantiene una relación de espesor a ancho menor a 1, en cualquier etapa de la laminación. Laminación no plana es cuando la forma de la sección transversal cambia en cada paso de la laminación, adoptando algunas veces figuras geométricas planas. En la laminación de no planos se incluye lo que se conoce como laminación de formas, esto quiere decir que la sección en cada paso es diferente a cualquier figura geométrica plana.

La laminación no plana en la Figura 3.1 corresponde a los molinos de barras, palanquilla, alambrón y perfiles pesados. Para la laminación plana el proceso se desarrolla en los molinos de placa y tira y por consiguiente la laminación en frío.

c) La etapa del proceso. Con relación a la etapa de proceso, la laminación se divide generalmente en desbaste, intermedia, y acabado. La laminación de desbaste consiste en reducir la materia prima rápidamente a una sección adecuada y manejable para los procesos siguientes. Generalmente esta laminación está separada de los siguientes procesos por una etapa de recalentamiento y corte. Sobre todo cuando se parte de lingote. La laminación intermedia es un proceso que se efectúa antes de dar el acabado final, la reducción es mínima comparada con el desbaste. La laminación de acabado es la etapa del proceso donde se obtiene el producto terminado [1].

3.4 REQUERIMIENTOS BASICOS PARA QUE SE EFECTUE LA LAMINACION.

Anteriormente se mencionó que para que el proceso de conformación del metal pueda ser llamado laminación, se requiere que el metal se deforme al pasar entre dos rodillos, sin embargo, para que el metal se introduzca entre ellos se requieren varias condiciones básicas sin las cuales el proceso no puede llevarse a cabo.

Un principio básico de la mecánica establece que cuando dos cuerpos en movimiento relativo son colocados en contacto, aparece una fuerza de fricción a lo largo de la tangente común en el punto de contacto. Esta fuerza actúa a lo largo de la tangente común y en dirección al movimiento relativo del otro cuerpo. Lo anterior se puede aplicar al caso en que una barra de acero es presentada frente a un par de rodillos girando a una velocidad X , si la barra se aproxima a los rodillos a una velocidad menor que la de los rodillos, entonces la fuerza de fricción que aparecerá al efectuarse el contacto tenderá a empujar la barra dentro del entrehierro de los rodillos (se llama entrehierro a la separación que existe entre un rodillo y otro). En el caso de que la barra se ponga en contacto con los rodillos a una velocidad mayor que la de éstos, entonces la fuerza de fricción tenderá a rechazar la barra y no entrará en el entrehierro. La primer condición para que se efectúe la laminación establece precisamente que la velocidad de la barra sea menor que la velocidad tangencial de los rodillos.

El ángulo formado por los centros de los rodillos, el punto de contacto del rodillo con la barra en la entrada y salida, se le conoce como ángulo de mordida, la medida de este ángulo determinará también la aceptación o no de la barra entre los rodillos. En la práctica se establece que el ángulo máximo de mordida debe de ser de 24° , para que la barra sea aceptada, con ángulos mayores se comienza a tener problemas en la laminación [5].

3.5 MECANICA DE LA LAMINACION

3.5.1 Compresión por deformación plana.

El modo de deformación predominante durante el proceso de laminación de productos planos es el de deformación plana, puesto que la reducción en altura que se imparte a la pieza de trabajo se traduce en elongación, siendo posible despreciar, en la gran mayoría de los casos, el ensanchamiento lateral.

En la Figura 3.2 se muestra en forma esquemática la geometría de un dispositivo diseñado para realizar un ensayo de compresión por deformación plana. La resistencia mecánica que ofrece un material en este modo de conformado puede ser determinada mediante el análisis de fuerzas actuando en un plano transversal (x-y) tal y como se muestra en la Figura 3.3 [6-9].

El balance de fuerzas a ambos lados de un elemento de espesor dx se puede escribir como:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) h = \sigma_x h + 2 \tau_{xy} dx \quad (3.1)$$

que se reduce a:

$$h d\sigma_x = 2 \tau_{xy} dx \quad (3.2)$$

donde h es el espesor de la pieza, σ_x es el esfuerzo normal y τ_{xy} es el esfuerzo cortante que se opone al desplazamiento lateral.

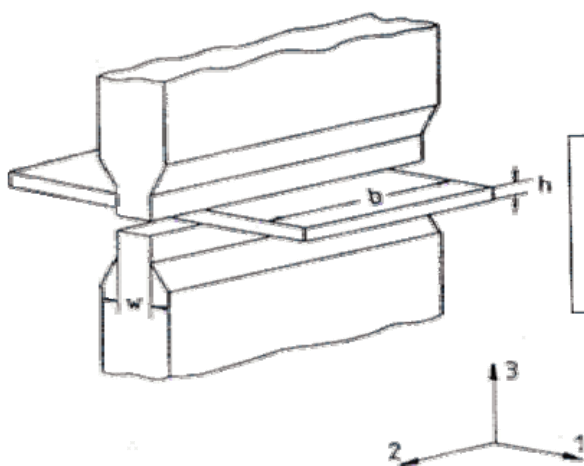


Figura 3.2 Esquema de la prueba de compresión por deformación plana [6-9].

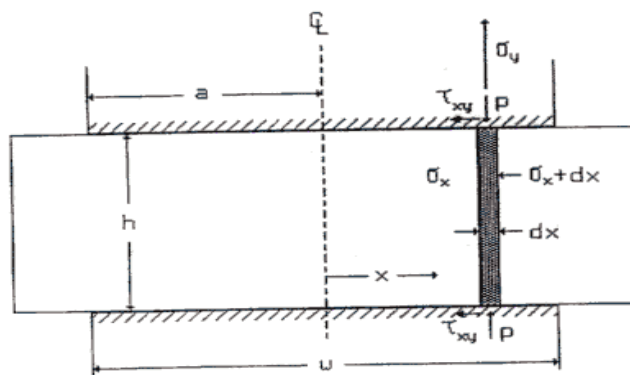


Figura 3.3 Balance de fuerzas en el plano transversal de la prueba de compresión por deformación plana [6-9].

En deformación plana:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2k = \sigma_3 + \sigma' \quad (3.3)$$

donde σ_1 y σ_3 son las tensiones principales máxima y mínima, k la tensión tangencial de fluencia y σ' la de fluencia en deformación plana de un sólido rígido perfectamente plástico, que se considera como constante.

Así en el caso, siendo discutido:

$$\sigma_x = \sigma_y + \sigma' = -p + \sigma' \quad (3.4)$$

donde p es la presión ejercida por el material contra la herramienta que lo deforma, Figura 3.3, por lo que:

$$d\sigma_x = -dp \quad (3.5)$$

Entonces, a partir de la ecuación (3.2)

$$hdp = -2\tau_{xy}dx \quad (3.6)$$

En los casos en que la deformación se realiza a temperatura ambiente, o en aquellas en las que es posible mantener lubricada la interfase material – herramienta, el coeficiente de fricción μ es lo suficientemente bajo como para que:

$$\tau_{xy} = \mu p \quad (3.7)$$

Por lo que, a partir de la ecuación (3.6):

$$\frac{dp}{p} = \frac{2\mu dx}{h} \quad (3.8)$$

Integrando ambos lados de la ecuación se obtiene:

$$\ln(p) = -\frac{2\mu x}{h} + \ln(C) \quad (3.9.a)$$

Que resulta en :

$$P = C \exp\left(-\frac{2\mu x}{h}\right) \quad (3.9.b)$$

donde C es la constante de integración que se evalúa en la forma, $x = a$ y $\sigma_x = 0$, lo que resulta en :

$$p = C = \sigma' \quad (3.10)$$

por lo que, al sustituir a la constante en la ecuación (3.9.b)

$$P = \sigma' \exp\left(-\frac{2\mu(a-x)}{h}\right) \quad (3.11)$$

En aquellos casos en que no es posible mantener lubricada la pieza, como es el caso del trabajo en caliente, el material aledaño a la herramienta se deforma plásticamente, de tal modo que:

$$\tau_{xy} = k \quad (3.12)$$

Por lo que, de acuerdo con la ecuación (3.6):

$$hdp = -2kdx = -\sigma' dx \quad (3.13)$$

que integrando, se convierte a:

$$P = -\sigma' \frac{x}{h} + C \quad (3.14)$$

una vez determinada C , la ecuación (3.14) se transforma a [6-9]:

$$P = -\sigma' \left(1 + \frac{a-x}{h}\right) \quad (3.15)$$

Las ecuaciones (3.11) y (3.15) indican la existencia de una colina de fricción en la interfase con la herramienta en ambos casos (Figura 3.4), por lo que la presión efectiva o promedio \bar{p} se determina por integración:

$$\bar{p} = \frac{1}{a} = \int_0^a p dx \quad (3.16)$$

en el caso de que se apliquen lubricantes, ecuación (3.11), resulta en:

$$\bar{p} = \sigma' \frac{h}{2\mu a} \left(\exp\left(\frac{2\mu a}{h}\right) - 1 \right) \quad (3.17)$$

y, cuando μ es pequeño, se reduce a:

$$\bar{p} = \sigma \left(1 + \frac{\mu a}{h} \right) \quad (3.18)$$

En el caso de fricción adhesiva se tiene:

$$\bar{p} = \sigma \left(1 + \frac{a}{2h} \right) \quad (3.19)$$

La fuerza total requerida para deformar al material estará dada por:

$$P = 2\bar{p}ab \quad (3.20)$$

Donde P es la fuerza, \bar{p} se obtiene de las ecuaciones (3.18) o (3.19), según sea el caso, y b es el ancho del material, Figura 3.2.

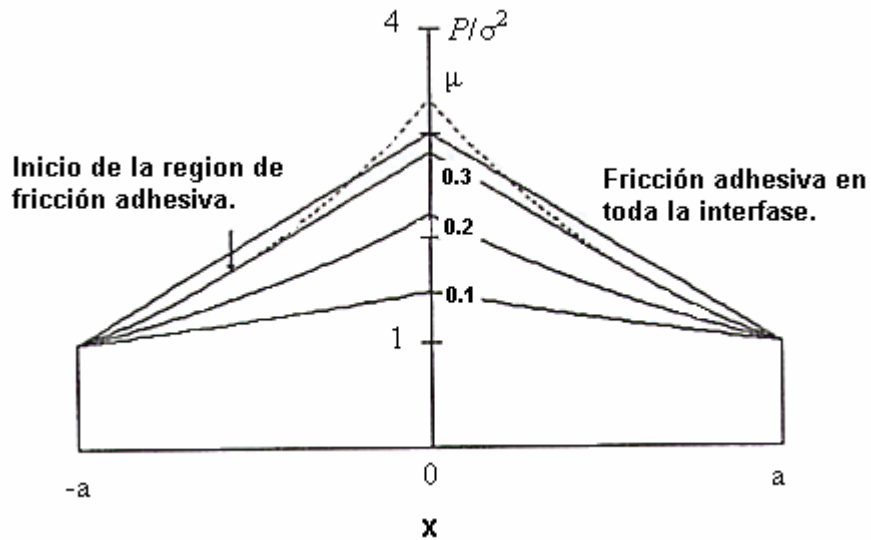


Figura 3.4 Colinas de fricción calculadas para una relación de $a=2h$ [6].

3.5.2 Fuerzas durante la laminación

El proceso de laminación se encuentra representado en la Figura 3.5. Debido a que el volumen es constante en la pieza de trabajo se cumplen las relaciones siguientes:

$$WH_bV_b = WHV = WH_aV_a \quad (3.21)$$

donde W es el ancho de la lámina; H_b , H y H_a son el espesor en la entrada, en la zona de deformación y en la salida, respectivamente; V_b , V y V_a son las velocidades en la entrada, en la zona de deformación y en la salida, respectivamente. Para satisfacer la ecuación (3.21), la velocidad en la salida V_a tiene que ser mucho mayor que la velocidad en la entrada. Por lo tanto la velocidad del material deformado en dirección de la laminación va aumentando constantemente de la zona de entrada a la salida. En sólo un punto a lo largo de la interfase entre rodillos y la lámina de la velocidad del rodillo, V_R , es igual a la velocidad de la lámina, éste es llamado plano neutro. Las fuerzas que se encuentran en el proceso de laminación son similares a las que se encuentran en compresión plana, puesto que la pieza sólo se mueve a la misma velocidad que los rodillos en este plano del entrehierro.

El análisis de las fuerzas de laminación puede ser realizado en forma similar a la que se empleó en el caso por deformación plana si se desprecia el efecto del ángulo α y se toma la longitud de contacto como:

$$2a = \sqrt{R\Delta h} \quad (3.22)$$

donde R es el radio de los rodillos y $\Delta h = h_b - h_a$ es la reducción en espesor. Al sustituir este valor junto con el espesor promedio de la lámina h :

$$h = \sqrt{h_a h_b} \quad (3.23)$$

En las ecuaciones (3.11) y (3.15) se predice una colina de fricción con un máximo en el plano neutro.

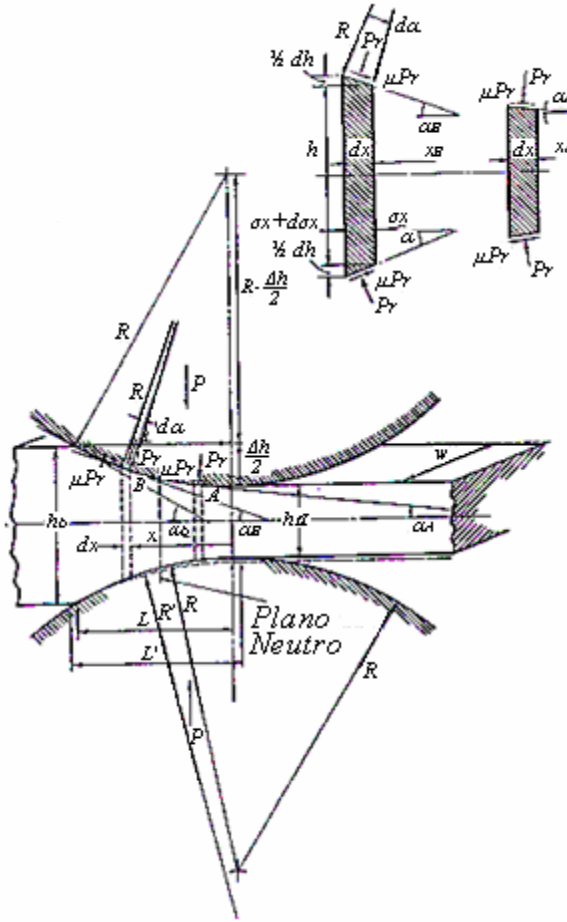


Figura 3.5 Sección de la mordida durante la laminación, en la que se muestran los esfuerzos a ambos lados del plano neutro [6].

Es posible determinar la fuerza durante la laminación en caliente, si se supone que la fricción es adhesiva al combinar las ecuaciones (3.10) y (3.20):

$$\frac{P}{b} = \sigma' \sqrt{R \Delta h} \left(1 + 0.25 \sqrt{\frac{R \Delta h}{h_a h_b}} \right) \quad (3.24)$$

que pueden escribirse como:

$$\frac{P}{b} = \sigma' \sqrt{R \Delta h} Q_p \quad (3.25)$$

La ecuación (3.15) fue modificada por Prandtl con el fin de incorporar la heterogeneidad en la deformación que se produce en el proceso de deformación:

$$P = \sigma' \left[\frac{\pi}{4} + \frac{(a-x)}{h} \right] \quad (3.26)$$

es decir, la falta de homogeneidad produce una reducción en la presión. El uso de la ecuación (3.26) en lugar de la (3.15) modifica el valor de P en la ecuación (3.25).

La presión ejercida por el material en la mordida de los rodillos provoca su deformación elástica y como se indica en la Figura 3.5, el arco de contacto aumenta, por lo que el radio a emplear en la ecuación (3.25) debe ser:

$$R' = R \left(1 + \frac{CP}{\Delta hb} \right) \quad (3.27)$$

donde R' es el radio de los rodillos deformados y C depende de las propiedades elásticas del material con que están hechos:

$$C = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \quad (3.28)$$

y, para el caso de los rodillos de hierro vaciado tiene un valor aproximado de $2 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{N}$.

El cálculo del par de torsión requerido para que la deformación se lleva a cabo se efectúa suponiendo que la fuerza de separación actúa con un brazo de palanca a una distancia a de la línea que une el centro de los rodillos como se puede ver en la Figura 3.6.

$$G = 2Pa \quad (3.29)$$

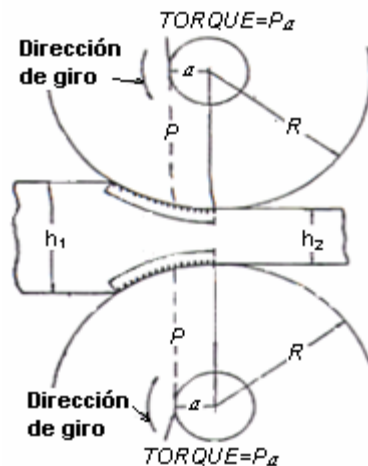


Figura 3.6 Método empleado para determinar el par de torsión [6].

La analogía con deformación plana en la Figura 3.6 permite suponer que α en la ecuación (3.29) es la mitad del arco de contacto, sin embargo, durante la laminación esta fracción m depende de la posición del plano neutro y, para el caso de laminación en caliente de acero, m disminuye de 0.5 a casi 0.4 conforme se incrementa el cociente de la longitud de contacto sobre el espesor promedio de la cinta con lo que la ecuación (3.28) se transforma a:

$$G = 2Pm\sqrt{R'\Delta h} \quad (3.30)$$

La forma de calcular la distancia del brazo de palanca al laminar en frío se complica un poco más, puesto que el aplastamiento que sufren los rodillos modifica la geometría del paso, incrementando la longitud del arco de contacto como se puede observar en la Figura 3.7 de tal suerte que el punto de salida de la lámina se desplaza de G a D , aumentando el brazo de palanca de α a $\alpha + X_0$, por lo que la fracción que contribuye al par de torsión se calcula por:

$$m = 0.5\sqrt{\frac{R}{R'}} - (0.5 - m')\sqrt{\frac{R}{R'}} \quad (3.31)$$

donde m' toma el valor de 0.43 o 0.48 según el proceso de laminación se efectuó con rodillos rugosos o lisos.

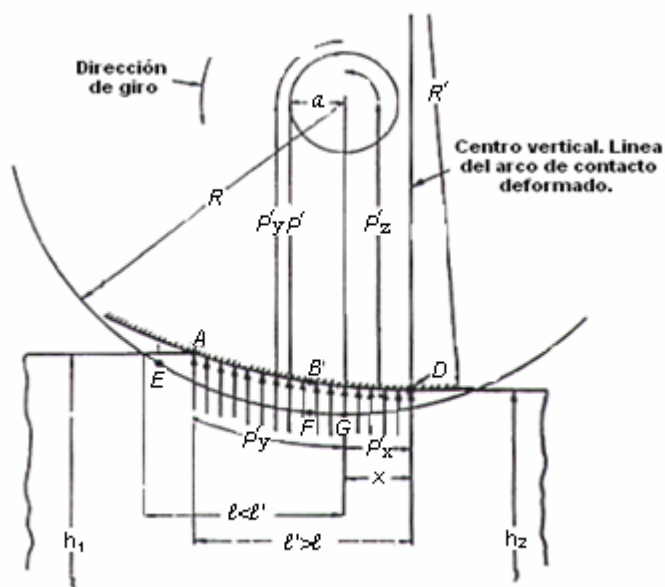


Figura 3.7 Desplazamiento del plano de salida de la cinta como resultado del aplastamiento de los rodillos [6].

3.5.3 Teorías de laminación

Las teorías de laminación parten de la postulada por von Karman en 1925, quien resolvió las condiciones de equilibrio dentro de la mordida. Los principios en que se basan son consistentes con la distribución de fuerzas que se encuentran durante la deformación plana, pero las ecuaciones diferenciales que se emplean son más completas y no pueden ser resueltas analíticamente sin establecer ciertas suposiciones o aproximaciones [6,9].

Ekelund publicó un análisis de laminación en 1927 en que el parámetro Q_p de la ecuación (3.25) se expresa como:

$$Q_p = 1 + \frac{1.6\mu(R\Delta h)^{0.5} - 1.2\Delta h}{h_a + h_b} \quad (3.32)$$

donde el coeficiente de fricción μ , en el caso de la laminación en caliente, se asocia con la temperatura (expresada en °C):

$$\mu = 0.84 - 0.0004T \quad (3.33)$$

que resulta ser válida para temperaturas superiores a los 700 °C.

Orowan propuso en 1943 lo que se reconoce como la teoría definitiva de laminación, modificando la solución de Prandtl para la compresión con herramientas paralelas de superficie rugosa, ecuación (3.26), que Nadai había demostrado que se podía utilizar para el caso de compresión con placas inclinadas. De esta forma; el obtuvo la expresión para las fuerzas horizontales f_x en el entrehierro:

$$\frac{df_x}{d\alpha} = 2P_r R \text{Sen}(\alpha) \pm R\sigma' \text{Cos}(\alpha) \quad (3.34)$$

donde la notación es la indicada en la Figura 3.5, que resulta en:

$$\frac{f_x}{h} = P_r - \sigma'v \pm \frac{\sigma'}{2} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{\tan(a)} \right] \quad (3.35)$$

El factor ν se introduce por la heterogeneidad en la deformación plástica y toma un valor de $\pi/4$ en láminas delgadas.

Sims propuso en 1995 lo que es tal vez la modificación a la teoría de Orowan más aceptada para laminación en caliente, en ella supuso, entre otras cosas, fricción adhesiva a lo largo del arco de contacto. La teoría de la laminación desarrollada por Orowan es aplicable también para laminación en frío, sin embargo es más aplicable con la modificación que hicieron Bland y Ford [6,9].

El balance de las fuerzas actuando en la dirección longitudinal x del elemento de ancho unitario del lado de salida del plano neutro, A , Figura 3.5, queda como:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \tan \alpha + 2\mu p_r dx = 0 \quad (3.36)$$

El balance de fuerzas en el elemento B , localizado en el lado de entrada, conduce a una ecuación similar, sólo que con el cambio en sentido de la fuerza fraccional:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \tan \alpha - 2\mu p_r dx = 0 \quad (3.37)$$

que, por conveniencia, pueden ser combinadas en una sola:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \tan \alpha \pm 2\mu p_r dx = 0 \quad (3.38)$$

en la que el signo positivo se refiere al lado de salida del plano neutro y negativo al lado de entrada. Sustituyendo $dh = 2 dx \tan \alpha$:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dh - 2\mu p_r dh \cot \alpha = 0 \quad (3.39)$$

ó

$$d(h\sigma_x) = -p_r(1 \pm \mu \cot \alpha)dh \quad (3.40)$$

La relación entre σ_x se establece a partir del criterio de fluencia:

$$\sigma_1 = \sigma_x; \sigma_3 = \sigma_y = -p \quad (3.41)$$

conviene mencionar que la segunda igualdad surge de que, normalmente, tanto la fricción como el ángulo de contacto son de pequeña magnitud, por lo que $\sigma_y \approx -p_r$ y esta última cantidad es igual a la presión vertical p , por lo que el sufijo se omite.

Sustituyendo los valores de la ecuación (3.41) por las condiciones de fluencia en compresión plana:

$$\sigma_x + p = \sigma'; d(\sigma_x) = d(\sigma' - p) \quad (3.42)$$

Con lo que la ecuación (3.40) se transforma a:

$$d(h\sigma_x) = d(h\sigma' - hp) = -p(1 \pm \mu \cot \alpha) dh \quad (3.43)$$

Se supone que el radio de los rodillos es constante y resulta conveniente expresar a dh en términos de sus coordenadas polares (R, α) :

$$dh = -2 R d\alpha \sen \alpha \quad (3.44)$$

Que resulta en:

$$d(h\sigma' - dp) = -2 R p \sen \alpha (1 \pm \mu \cot \alpha) d\alpha \quad (3.45)$$

Expresando la ecuación anterior en términos del parámetro $S = p/\sigma'$, se modifica a:

$$\frac{d}{d\alpha} [h\sigma'(1 - S)] = -2 R p \sen \alpha (1 \pm \mu \cot \alpha) d\alpha \quad (3.46)$$

$$h\sigma' \frac{d(1 - S)}{da} + (1 - S) \frac{d(h\sigma')}{da} = -2Rp(\sen \alpha \pm \mu \cot \alpha) \quad (3.47)$$

Esta ecuación presenta cierta dificultad es su integración, sin embargo, puesto que la variación en la presión ejercida por los rodillos es mayor que la variación de la tensión de fluencia y el hecho de que el producto $h\sigma'$ disminuya aún más, dado que h disminuye conforme σ' aumenta, permite despreciar el segundo termino, por lo que la ecuación (3.47) se convierte en:

$$h\sigma' \frac{dS}{d\alpha} = -2Rp(\sen \alpha \pm \mu \cot \alpha) \quad (3.48)$$

que puede ser simplificada al considerar que el ángulo de contacto es pequeño

$$\sen \alpha \approx \alpha; \quad \cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \approx 1 \quad (3.49)$$

$$h = h_a + 2R(1 - \cos \alpha) \approx h_a + 2R \frac{\alpha^2}{2} \quad (3.50)$$

donde $h\alpha$ es el espesor de salida de la lámina, por lo que la ecuación (3.48) se transforma a:

$$\frac{dS}{d\alpha} = -2RS \frac{\alpha \pm \mu}{h_a + R\alpha^2} \quad (3.51)$$

Ambos lados de la ecuación pueden ser integrados para obtener la solución general:

$$\frac{dS}{S} = \frac{2\alpha d\alpha}{h_a} \quad (3.52)$$

$$\ln S = \ln\left(\frac{h_a}{R} + \alpha^2\right) \pm 2\mu \frac{1}{\sqrt{h_a/R}} \tan^{-1}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{h_a/R}}\right) + C \quad (3.53)$$

donde C es la constante de integración. Introduciendo el parámetro H igual a:

$$H = 2\sqrt{\frac{R}{h_a}} \tan^{-1}\left(\alpha \sqrt{\frac{R}{h_a}}\right) \quad (3.54)$$

la ecuación (3.53) se reduce a:

$$\ln S = \ln\left(\frac{h}{R}\right) \pm \mu H + C \quad (3.55)$$

así, del lado de salida del plano neutro:

$$S^+ = C^+ \frac{h}{R} \exp(\mu H) \quad (3.56a)$$

y del lado de entrada:

$$S^- = C^- \frac{h}{R} \exp(-\mu H) \quad (3.56b)$$

Las constantes de integración en el caso de que no se aplique tensión en ningún lado ($\sigma_a = \sigma_b = 0$); se tiene para el lado de salida:

$$S_b = C^+ \frac{h_b}{R} \exp(\mu H_a); H_a = 2\sqrt{\frac{R}{h_a}} \tan^{-1}\left(\alpha_a \sqrt{\frac{R}{h_a}}\right) \quad (3.57)$$

pero:

$$\alpha_a = 0 : \quad \sigma_{xa} = 0 \quad (3.58)$$

por lo que $H\alpha = 0$ y por la ecuación (3.42):

$$p_a = \sigma'_a - \sigma_{xa} = \sigma'_a \quad (3.59)$$

así que:

$$1 = C^+ \frac{h_a}{R} \therefore C^+ = \frac{R}{h_a} \quad (3.60)$$

y para el lado de entrada se tiene:

$$S_b = C^- \frac{h_a}{R} \exp(\mu H_b); H_b = 2 \sqrt{\frac{R}{h_b}} \tan^{-1} \left(\alpha_b \sqrt{\frac{R}{h_b}} \right) \quad (3.61)$$

como $\sigma_{xb} = 0$:

$$p_b = \sigma'_b - \sigma_{xb} = \sigma'_b \quad (3.62)$$

por lo que:

$$1 = C^- \frac{h_b}{R} \exp(-\mu H_b) \therefore C^- = \frac{R}{h_b} \exp(\mu H_b) \quad (3.63)$$

De acuerdo con las ecuaciones (3.60) y (3.63), las ecuaciones (3.56) pueden ser escritas como:

$$S^+ = \frac{h}{h_a} \exp(\mu H) \quad (3.64.a)$$

para el lado de salida y

$$S^- = \frac{h}{h_b} \exp[-\mu(H_b - H)] \quad (3.64b)$$

para el lado de entrada.

Las ecuaciones presentadas hasta este punto son empleadas para laminación sin aplicar tensión; sin embargo, la mayor parte de la producción de lámina se lleva a cabo en trenes continuos o en instalaciones individuales que aplican tensión al enrollar y desenrollar la cinta.

La aplicación de tensiones en el lado de salida cambia las condiciones:

$$\sigma_{xa} = t_a; \sigma_a = 0; H_a = 0 \quad (3.65)$$

por lo que la condición de fluencia, ecuación (3.42), queda como:

$$p_a = \sigma_a' - t_a \quad (3.66)$$

la constante de integración de la ecuación (3.56.a) resulta ser igual a:

$$S_a = 1 - \frac{t_a}{\sigma_a'} = C^+ \frac{h_a}{R} \exp(\mu H_a) = C^+ \frac{h_a}{R} \quad (3.67)$$

de donde resulta que:

$$C^+ = \left(1 - \frac{t_a}{\sigma_a'} \right) \frac{R}{h_a} \quad (3.68.b)$$

La constante para el lado de entrada se calcula en forma similar:

$$C^- = \left(1 - \frac{t_b}{\sigma_b} \right) \frac{R}{h_b} \exp(\mu H_b) \quad (3.68.b)$$

Estas constantes son similares a las encontradas cuando se lamina sin tensión, ecuaciones (3.60) y (3.63), la única diferencia es el factor $(1 - t/\sigma')$ que resulta ser igual a la unidad cuando $t = 0$. Consecuentemente las ecuaciones (3.64) se transforman a:

$$S^+ = \frac{h}{h_a} \left(1 - \frac{t_a}{\sigma_a'} \right) \exp(\mu H) \quad (3.69.a)$$

para el lado de salida y

$$S^- = \frac{h}{h_b} \left(1 - \frac{t_b}{\sigma_b} \right) \exp[-\mu(H_b - H)] \quad (3.69.b)$$

para el lado de entrada.

Las ecuaciones (3.69) se igualan para encontrar la posición del plano neutro:

$$\exp[-\mu(H_b - 2H_n)] = \frac{h_b}{h_a} \left(\frac{1 - \frac{t_a}{\sigma_a'}}{1 - \frac{t_b}{\sigma_b}} \right) \quad (3.70)$$

donde el suscrito n se emplea para designar al plano neutro; si se iguala la expresión de la derecha de la ecuación (3.70) a y :

$$\ln y = \mu(H_b - 2H_n) \quad (3.71)$$

de donde:

$$h_N = \frac{h_b}{2} - \frac{\ln y}{2\mu} \quad (3.72)$$

Sustitución de Hn en la ecuación (3.54) resulta en:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{h}{R}} \tan\left(\sqrt{\frac{h_a}{R} \frac{H_n}{2}}\right) \quad (3.73)$$

que es el ángulo al que se encuentra el plano neutro [6].

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] United States Steel Corporation, The making, shaping and treating of steel, Pittsburg Pensilvania, Estados Unidos de America, 1996.

- [2] Cámara nacional de la industria del hierro y el acero (CANACERO), <http://www.canacero.org.mx>

- [3] Altos Hornos de México S.A de C.V, Monclova Coahuila, México, 2005.

- [4] Lawrence E. Doyle, Materiales y procesos de manufactura para ingenieros, Editorial Prentice Hall, México D.F, 1988.

- [5] British Steel Corporation, Roll Pass Design, Sheffield, Inglaterra, 1979.

- [6] R. Colás y J.M Cabrera, Laminación en caliente, Segundo seminario de Tecnología Metalúrgica, Editorial ASM España, Barcelona, España, 1988.

- [7] Metals Handbook, Volumen 8, Editorial ASM, Ohio, Estados Unidos de America, 1985.

- [8] G.E Dieter, Mechanical Metallurgy, Editorial Mc. Graw-Hill, Nueva Cork, Estados Unidos de America, 1986.

- [9] W. Roberts, Deformation Processing and Structure, Editorial G.Krauss, ASM, 1982.

CAPITULO 4

DESCRIPCIÓN Y FABRICACIÓN DE RODILLOS DE LAMINACION.

4.1 INTRODUCCION Y CLASIFICACION DE LOS MOLINOS DE LAMINACION.

No se tienen datos sobre quien o cuando se inicio el uso de rodillos para impartir un trabajo mecánico a los materiales. Es muy posible y es la creencia general que los primeros intentos se hayan hecho para extraer el jugo de la caña de azúcar, ya que se tienen referencia que en el antiguo Egipto se usaban una especie de molinos con rodillos movidos a mano o con bueyes para tal efecto.

En 1449, Pietro Speciale de Silicia, construyó un molino trío con rodillos de madera engranados juntos, siendo el motriz el rodillo medio, para moler caña de azúcar. En 1471, Rudolph de Nuremburg utilizó rodillos de hierro de 3.7 cm (1 1/2") de diámetro para laminar alambre de oro, pero el primer diseño plasmado ya en dibujos de un molino para trabajar metales fue realizado por Leonardo Da Vinci en 1486, el cual incluía rodillos de apoyo, no se sabe sin embargo si se llegó a construirse el diseño. En 1553, un francés llamado Brulier, utilizó un molino con rodillos planos para producir láminas de oro y plata y no fue sino hasta el año de 1590 que un molino se utilizó para trabajar el hierro en caliente. Este molino fue construido por Godefroi de Bochs, en Dartford, Kent, Para laminar redondos a partir de pequeñas barras, según una patente de Bervis Bulmer. En 1697 aparecieron los primeros rodillos de hierro templado (chilled roolls) y fueron usados por John Hanbury en Pontypool para laminar hojas de 1.10 m x 0.55m (48" x 24") para hojalata [1].

Antes de describir a un rodillo de laminación es importante conocer los equipos mecánicos en donde son utilizados estas herramientas de operación, por tal motivo a manera de introducción se inicia describiendo y caracterizando los diferentes tipos de molinos de laminación.

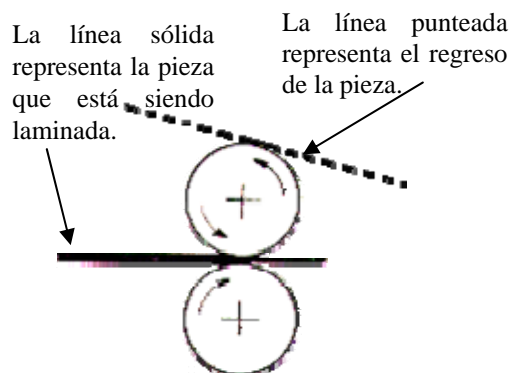
Hoy en la actualidad existe un gran número de diseño de molinos de laminación, los cuales se podrían clasificar tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

(a) Por su característica de diseño, principalmente el arreglo de sus rodillos (Figura 4.1), tales como molino dúo (dos rodillos, continuo y reversible), tríos (tres rodillos), cuartos (cuatro rodillos), agrupados (arreglo de más de cuatro rodillos). Cuando el molino tiene instalados rodillos verticales y horizontales, se le conoce como molino universal.

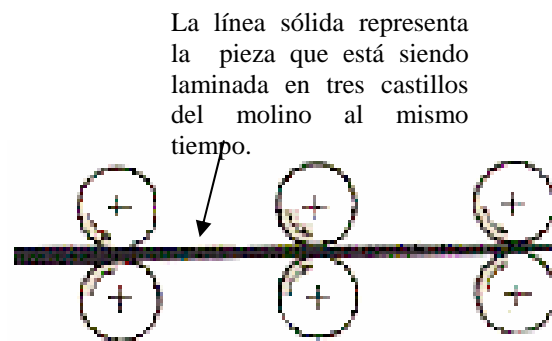
(b) Por los productos que laminan como molino de tira, molino de barras, molino de alambrón, molino de placa, etc.

(c) Por el diámetro de los rodillos que utilizan o por la longitud de la tabla, por ejemplo molino de 355.6 mm, molino de 558.8 mm, molino de 3302 mm.

Con el desarrollo de la laminación y la necesidad de mayor producción se vio la conveniencia de usar simultáneamente más de un molino y entonces nació el tren de laminación. Se le llama tren de laminación a un conjunto de molinos que trabajan sobre una barra o varias al mismo tiempo. Así como existen diversidad de molinos también hay una variedad de trenes que reciben sus nombres de acuerdo a la configuración o arreglo en que están sus molinos. Un tren de laminación es un conjunto de por lo menos dos molinos que trabajan simultáneamente sobre una misma barra. En la actualidad no existen plantas laminadoras que trabajen con un tren de dos molinos, a excepción de algunos trenes para placa o templadores. Por lo general, actualmente, el mínimo necesario para una producción aceptable son 5 molinos y el máximo, no más de 26 [2].

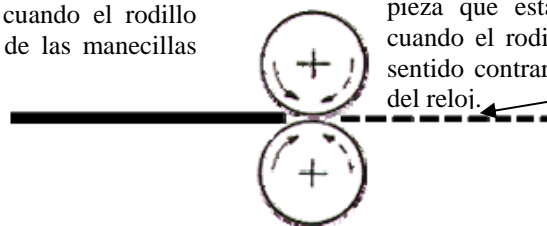


Molino duo, pases variables.

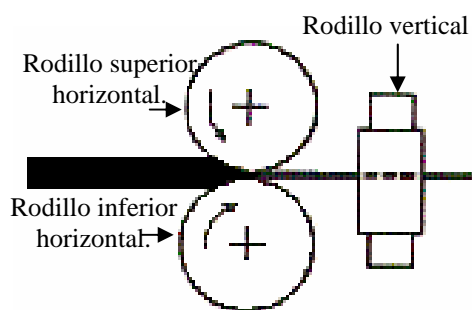


Molino continuo.

La línea sólida representa la pieza que está siendo laminada cuando el rodillo inferior gira en favor de las manecillas del reloj.



Molino duo reversible.



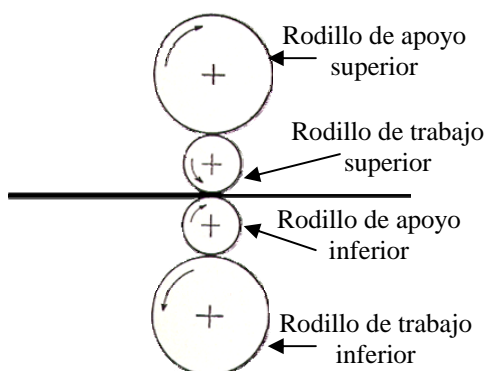
Molino universal

La línea punteada representa la pieza que está siendo laminada entre el rodillo superior y el rodillo intermedio.

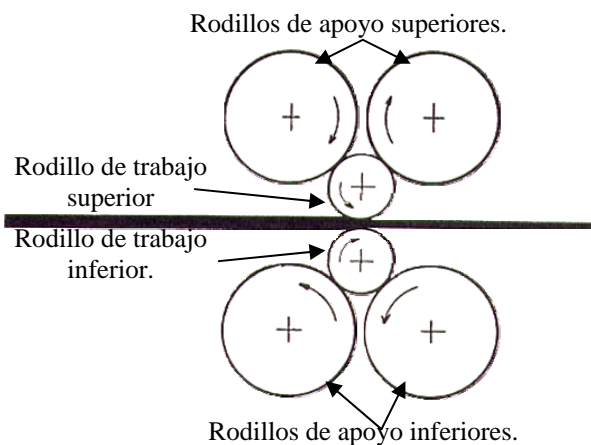
La línea sólida representa la pieza que está siendo laminada entre el rodillo inferior y el rodillo medio.



Molino trío



Molino de cuatro rodillos



Molino con arreglo de rodillos.

Figura 4.1.- Representación de los principales tipos de molinos de laminación. [2]

4.2. – CONSTRUCCION DE UN MOLINO DE LAMINACION.

El molino considerado como una unidad de producción consta aparte de los rodillos y del castillo, de un gran número de piezas y mecanismos que lo configuran como un equipo bastante complejo. En la Figura 4.2, se muestran las principales partes de un molino de laminación [1].

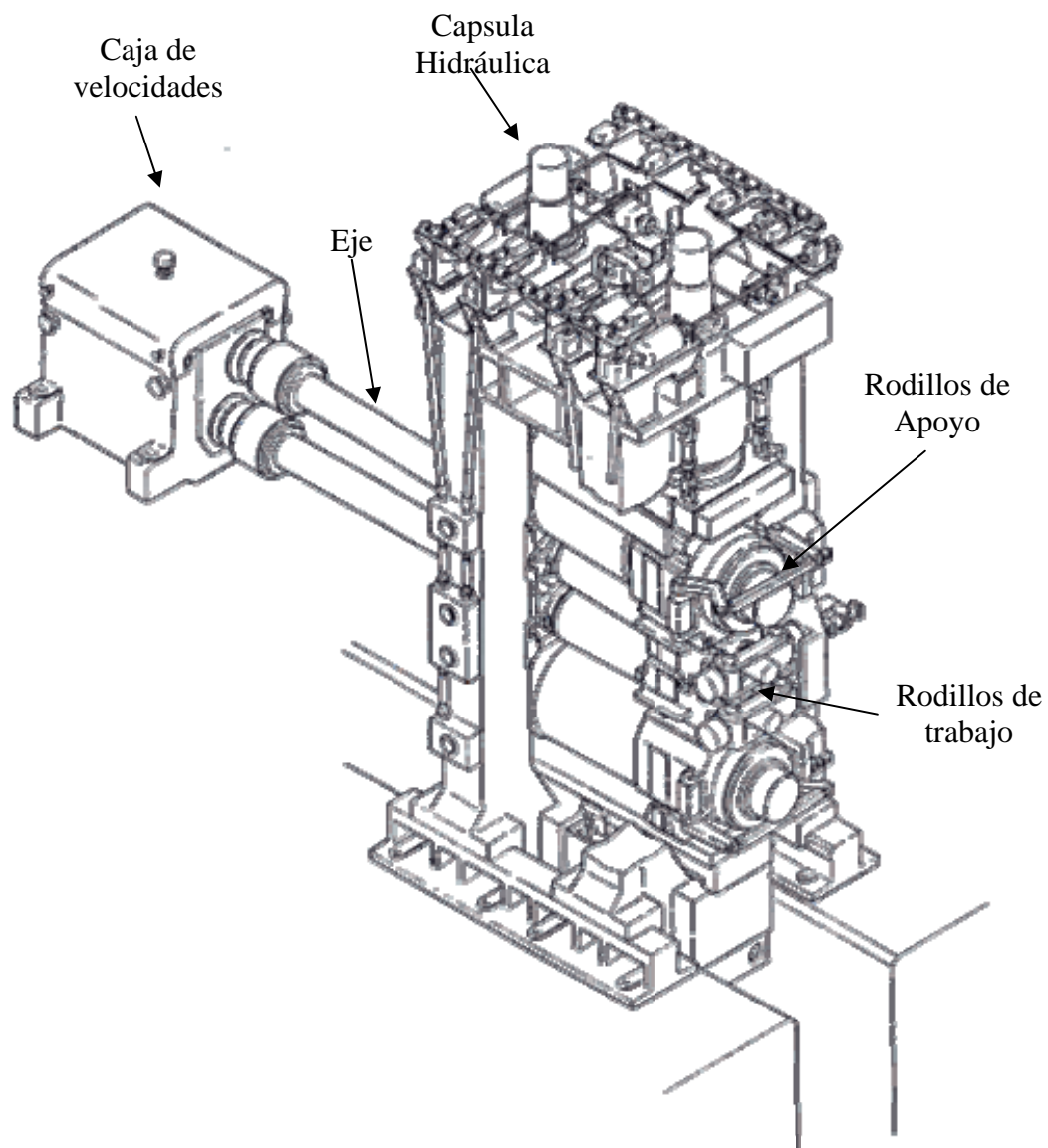


Figura 4.2. Partes principales de un molino de laminación [1].

4.3. – DESCRIPCION DE UN RODILLO DE LAMINACION.

Al definir la laminación se mencionó que el rodillo es la herramienta principal de este proceso. También se habló de que en la laminación se generan fuerzas muy grandes que actúan sobre los rodillos. Teniendo esto en mente se puede decir que un rodillo de laminación es un cilindro de metal, generalmente aleado, que desde luego deberá de ser más duro que el material que se lamina para que pueda ser resistente al desgaste. El material deberá de ser homogéneo, es decir, sin discontinuidades (porosidades, grietas, inclusiones, etc.) para que resista los esfuerzos para los que fue diseñado. Deberá de soportar las temperaturas a las que será sometido durante el proceso, suponiendo desde luego un buen enfriamiento.

En la Figura 4.3, Se muestra un rodillo de trabajo convencional donde se identifican las partes principales, las cuales son el cuerpo o tabla que estará en contacto con el material que lamina, lleva en los extremos de la tabla los cuellos o espigas que se apoyan en los cojinetes o chumaceras arrastradas por su cuñero y sujetadas por un candado de seguridad, en el extremo de la espiga motriz se le inserta un cople para proporcionar el par de torsión. Existen dos tipos de acoplamientos llamados de trébol y de paleta, el más común es el de tipo paleta o plano.

El rodillo de laminación debe de ser considerado como una herramienta de precisión, debido a la actividad que desempeña, de no ser así se obtendrían productos laminados de segunda calidad o chatarra. Los rodillos en servicio son considerados como una viga apoyada en dos puntos con una carga actuando en cualquier punto de su cuerpo.

A los rodillos de laminación se le instalan en sus muñones chumaceras que les permiten girar lo más libremente posible, estas chumaceras con sus rodillos, se instalan a su vez en el castillo. Cuando los rodillos están nuevos, estas chumaceras quedan separadas una de la otra, a medida que se usa el juego de rodillos su diámetro va disminuyendo y la distancia entre chumaceras se va reduciendo. Cuando esta distancia se hace cero, es decir cuando las chumaceras se tocan, se dice que el diámetro de los rodillos ha llegado al diámetro de desecho o de chatarra.

La producción de acero depende en gran parte de los rodillos de laminación es por eso que el rodillo es considerado como una herramienta muy valiosa y de echo es la principal e imprescindible herramienta de la industria acerera [1].

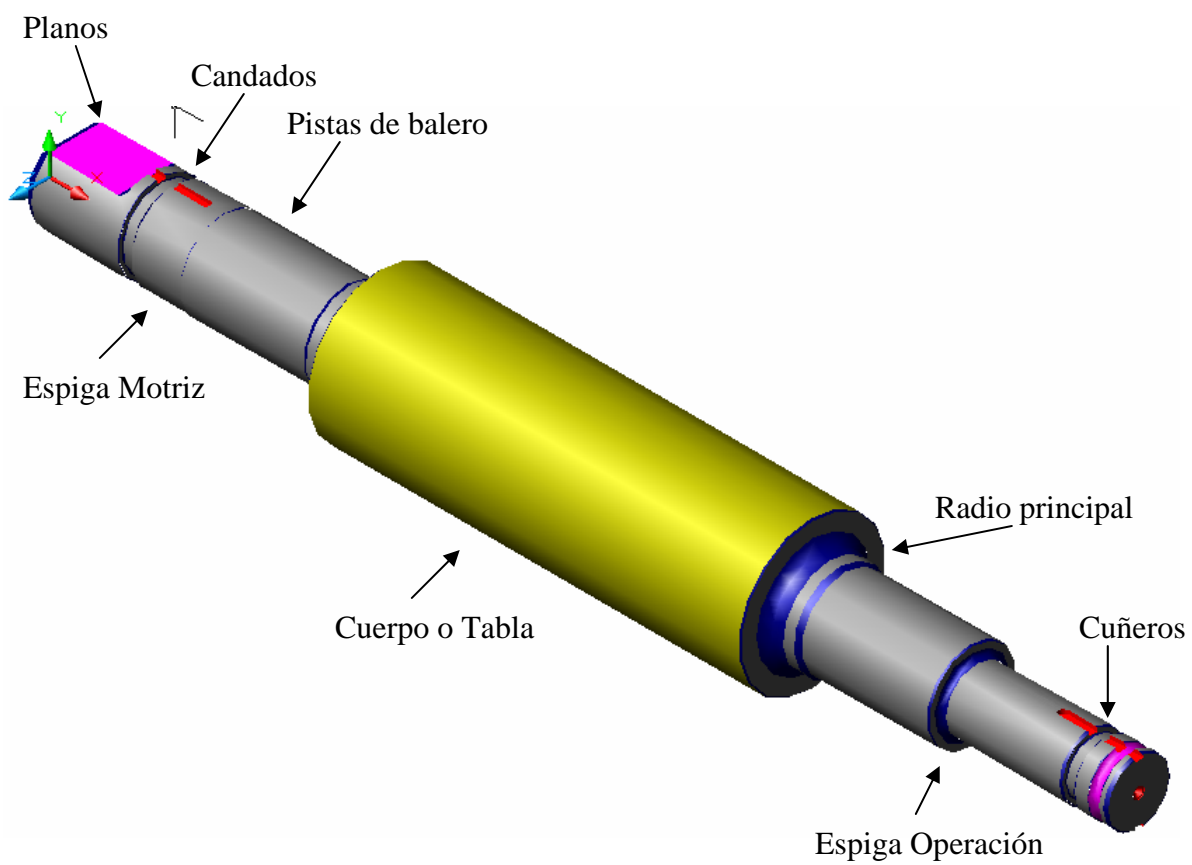


Fig. 4.3. Partes principales de un rodillo de laminación[3].

4.4. – CLASIFICACION DE LOS RODILLOS DE LAMINACION.

Los rodillos de laminación se clasifican considerando algunas especificaciones. La primer clasificación es por el molino de aplicación, tal como molino de trabajo para placa, alambrón, tira, perfiles, etc. Otra clasificación, sería por la apariencia de su estructura, la cual se divide en rodillos vaciados de acero y rodillos vaciado de hierro. El contenido de carbono en los rodillos vaciados de acero varía desde 0.40 a 2.50 %, los rodillos forjados pueden variar entre 0.50 y 1.50 %C y los aceros grafitados varían entre 1.50 y 2.50 de %C. El contenido en los rodillos vaciados de hierro varía entre 2.50 y 3.60 de %C. Otra clasificación de los rodillos, la tercera, la cual es la más aceptada por los productores de rodillos y usuarios de molinos de laminación es por el proceso de producción, tal como se muestra en la Tabla 1.

Esta clasificación divide a los rodillos en tres grupos; el primer grupo los rodillos vaciados, los cuales pueden ser simples (de un solo material) o dobles (núcleo de material suave y cuerpo de material duro), a su vez los rodillos dobles pueden ser producidos por vaciado estático con derrame o vaciado centrífugo. La última subdivisión para este grupo es para el vaciado centrífugo, el cual puede realizarse en maquinas horizontales, verticales o con un plano inclinado.

El segundo grupo es el que produce rodillos por medio del proceso de forjado y pueden ser forjado rectos o preformados. El último grupo es el que aplica la técnica de metalurgia de polvos, el cual debido a su alto costo de producción tiende a desaparecer [1].

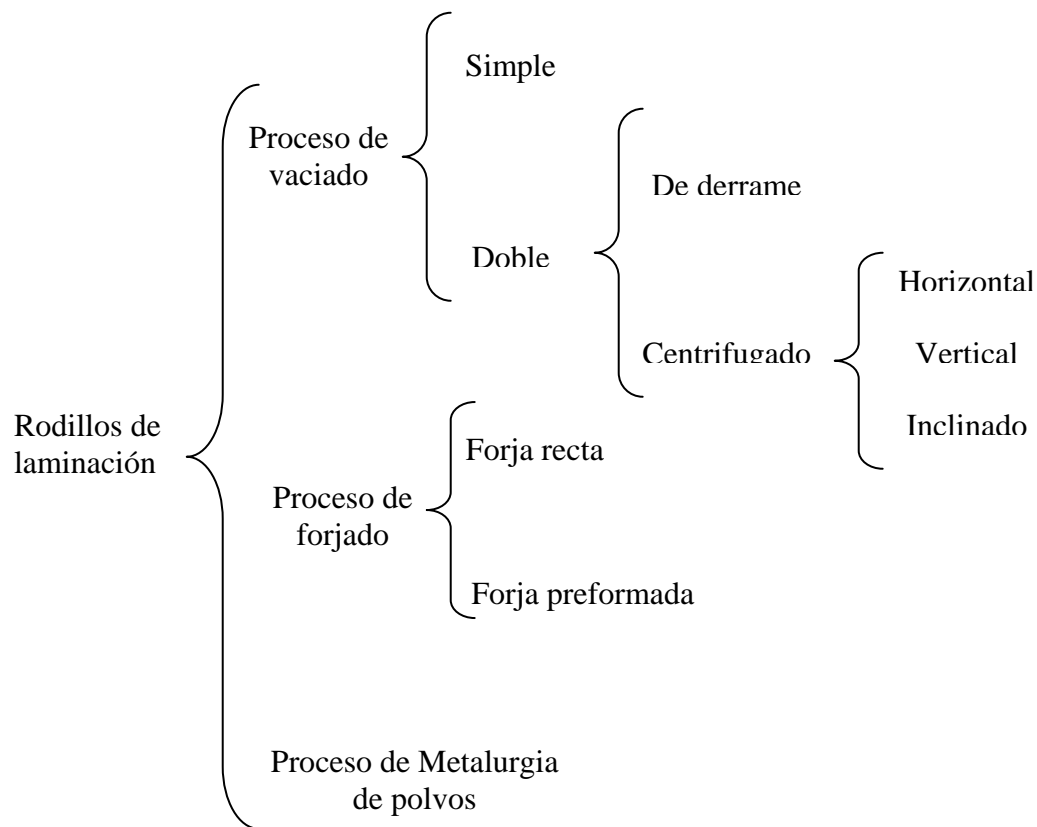


Tabla 1.- Clasificación de rodillos por su proceso de producción [1].

4.5. – PROCESO DE PRODUCCION DE RODILLOS VACIADOS CENTRIFUGADOS.

El desarrollo de este proyecto se enfoca en el desgaste de rodillos de trabajo que se utilizan para laminar en los castillos 4, 5 y 6 de un molino de tira, por tal motivo de aquí en adelante el enfoque principal será para los rodillos de hierro producidos por medio del vaciado centrifugado, para lo cual se describen cada una de las etapas de producción representadas en la Figura 4.4.

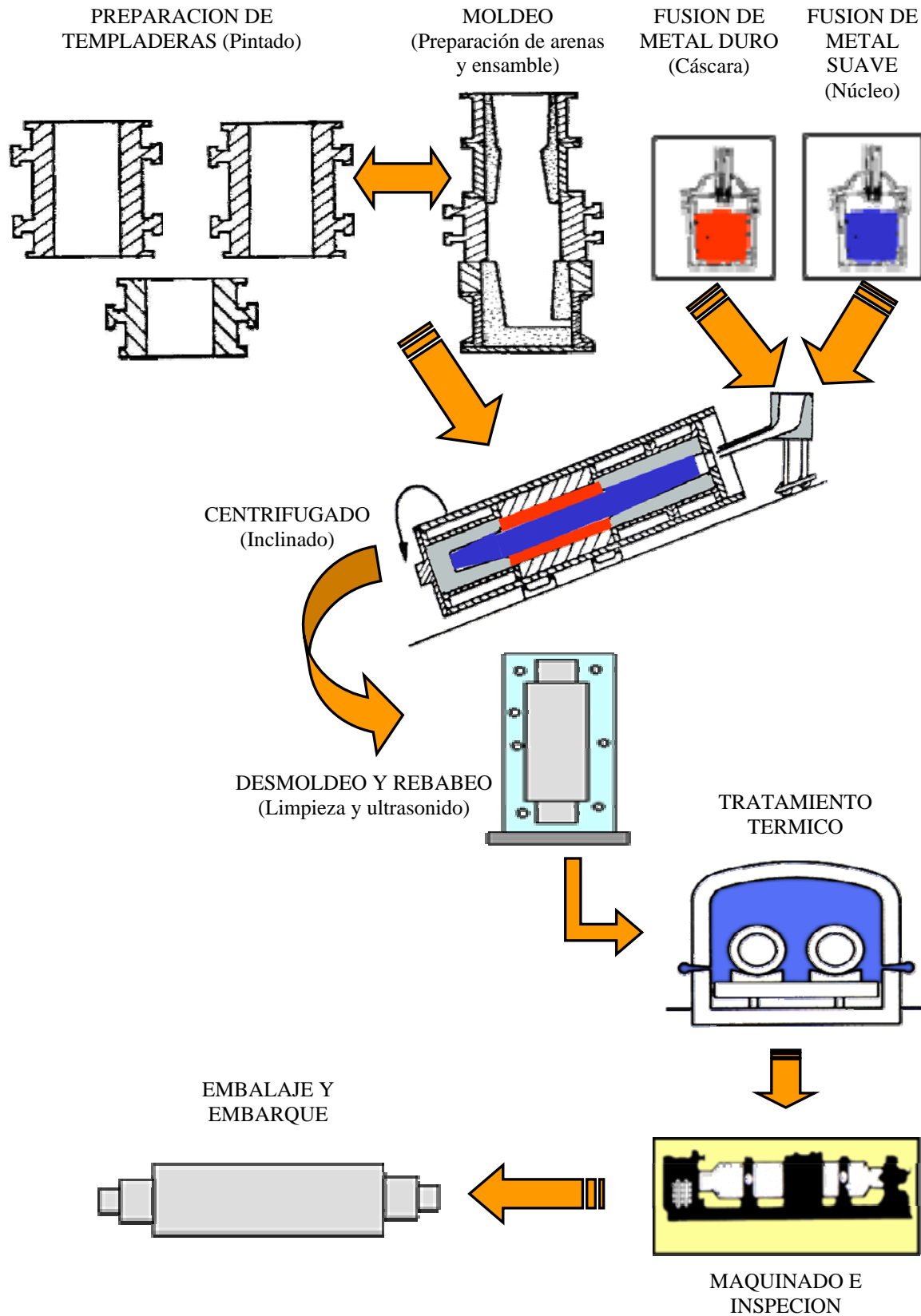


Figura 4.4 Diagrama de flujo para la fabricación de rodillos centrifugados [3].

4.5.1. – Preparación de templaderas y moldeo.

La fundición de metales es el proceso de fabricación de objetos que se lleva a cabo al verter el metal en un molde previamente preparado. Existen dos tipos de moldes para la colada de rodillos, los cuales son de arena y permanentes (moldes de metal). En los dos casos, la preparación del molde requiere de un modelo. El modelo de una pieza de fundición, es una réplica del rodillo original y se hace de madera por lo regular, combinándolos con otros materiales como son el aluminio, yeso ó plástico. Se toma en cuenta la contracción que sufre el metal al solidificarse por lo que los modelos se hacen de una medida mayor.

Cuando los metales o sus aleaciones se solidifican y enfrían, sufren siempre una contracción de volumen. Los metales se contraen en tres etapas diferentes; pasan por una contracción líquida al enfriarse desde la temperatura de colado a la de solidificación, por una reducción en volumen al solidificar y por la contracción sólida al enfriarse la pieza hasta temperatura ambiente.

La contracción líquida en el acero es de 1.6% por cada 100°C y la contracción por solidificación es de 5.34%. De las contracciones tanto líquida como de solidificación, la segunda es la más importante. La última contracción (sólida) resulta en una fundición ligeramente más pequeña que la cavidad del molde y, por lo tanto, los modelos deben de hacerse ligeramente más grandes que la pieza vaciada que se desea; a esta contracción se le llama contracción del modelista. La contracción sólida resulta también (si no es controlada con propiedad) en esfuerzos internos que pueden causar deformación o fractura en caliente.

Para la preparación de moldes es necesario elegir bien las arenas de moldeo; en el proceso de vaciado de acero se debe tomar en cuenta su preparación, mezcla y secado. Los principales requisitos de las arenas de moldeo son características refractarias, cohesión, porosidad y permeabilidad. La arena ha de resistir el calor del metal fundido, por cuya razón es necesario que tenga una gran proporción de sílice con un mínimo de los ingredientes que aumenta la fusibilidad, tales como ciertos óxidos metálicos. Por lo tanto, para trabajar con fundiciones ligeras ordinarias se requiere una proporción de sílice

próxima al 80%, para la fundición media el 85%; para la pesada del 90-93%. Sin embargo, en el caso de las piezas moldeadas de acero, las arenas que tienen un material de unión con punto de fusión relativamente bajo, como ocurre con ciertas arcillas naturales, tienden a producir una superficie metálica mucho más limpia que las arenas más refractarias.

La arena ha de formar un todo y mantener la forma una vez que ha sido compactada por golpeo con la maza y resistir la fluencia y presión del metal fundido. Algunos metales en estado líquido, tales como el acero, tienen una pronunciada acción excavadora sobre la arena.

El termino arcilla se le nombra a un particular grupo de minerales, en el que el principal constituyente es el silicato alumínico hidratado, que varía desde el caolín a las arcillas refractarias duras y negras. La propiedad distintiva de la arcilla es su plasticidad que es transmitida de la masa de la arena en presencia de la humedad. Sus características son afectadas tanto por su composición como por su estructura. Las arcillas que se mezclan en las arenas de moldeo han de tener un diámetro menor de 20 μm . Estas arcillas contienen dos ingredientes: un fango fino sin poder cohesivo y la verdadera arcilla, que es la que une los granos de arena.

Uno de los materiales de unión más empleados en el moldeo de rodillos de acero es la bentonita, que es una sustancia análoga a la arcilla, formada por la acción de los agentes atmosféricos sobre las cenizas volcánicas y compuestos de minerales de la familia de la montmorillonita ($\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Al}_{14}(\text{OH})_4\text{OH}_2\text{O}$).

Para que las piezas no sean defectuosas es necesario que el aire del molde y los gases engendrados por el calor del metal salgan sin impedimento a través de las paredes de la arena. El termino porosidad se refiere al número de espacios que existe entre los granos de arena y está regido, principalmente, por el tamaño y forma de estos mismos granos, proporciones de los materiales de unión, la humedad presente y la densidad de la arena una vez comprimida.

La permeabilidad de una arena es diferente de la porosidad, si bien está íntimamente relacionada con ésta, y se relaciona con la facilidad con que escapan los gases a través de la arena. Las arenas que tienen granos de tamaño uniforme proporcionan un conjunto

abierto o poroso, en tanto que las arenas con tamaño de grano variado tienden a producir una masa íntimamente empaquetada y menos porosa.

La proporción del material de unión presente influye en la permeabilidad. El exceso de aglutinante tiende a llenar los poros, que, por lo tanto, disminuye la permeabilidad, aunque pueda producir una arena fuerte con buenas cualidades cohesivas. Análogamente un exceso de humedad disminuye la permeabilidad de la arena, produciendo la saturación de ésta y a la vez que llena los poros, tiende a desalojar el aglutinante. Cuando esto sucede se debe de considerar en el diseño del molde una cantidad de respiros que permitan el libre flujo de gas generado durante el proceso de vaciado.

El efecto del secado del molde es aumentar la permeabilidad ya que se hacen mayores los poros debido a la contracción de los granos de arena. Una proporción excesiva de sílice hace que la unión sea deficiente en tanto que un exceso de arcilla disminuye el carácter refractario y la porosidad, y es mayor la contracción de arena en el molde.

Los constituyentes principales de la arena son el cuarzo, que forma los granos reales y que comunica la cualidad refractaria de la arcilla, el silicato aluminico, que lleva asociado óxido de hierro hidratado, que es el aglutinante de los granos de cuarzo, y los feldespatos, que contienen los óxidos básicos de calcio, manganeso y potasio, cuyo efecto es aumentar la fusibilidad de la arena para disminuir la porosidad [1,3].

4.5.2. - Fusión.

Se le llama fusión a toda operación realizada a elevada temperatura en la que se obtiene metal líquido. En el proceso de fusión se utilizan varios tipos de hornos, seleccionando el más económico, tomando en cuenta el tipo de material a obtener, capacidad de carga del combustible o energía eléctrica que se necesita. Los hornos más comunes para la producción de rodillos de laminación son los hornos eléctricos, para lo cual existe gran variedad de ellos.

Puesto que la chatarra es la materia prima en la fusión mediante hornos eléctricos, existe la necesidad de clasificarla. Es común en instalaciones que cuentan con este tipo de hornos, el tener de 20 a más depósitos separados de chatarra para lograr la utilización máxima de elementos aleantes no oxidables (níquel). La manera en que se carga la chatarra (secuencia) en las cestas de carga afecta la eficiencia del horno y la vida de los refractarios. La chatarra no aleada debe separarse en ligera y pesada. Se requiere un control constante de la calidad de la chatarra, ya que una carga errónea puede ocasionar una fusión fuera de especificación si contiene elementos contaminantes.

La secuencia en la preparación de la carga para un horno eléctrico consiste de una serie de pasos que se describen a continuación. La preparación del horno se facilita inclinando ligeramente el horno hacia atrás o hacia el frente. La operación de carga se lleva a cabo con una cesta, toda la bóveda se levanta completamente de sus soportes y luego se desplaza o se gira. Se lleva entonces sobre el horno la cesta precargada con chatarra y se descarga dentro del mismo. Son normales una o dos recargas después de fundir la carga inicial.

La primera carga debe contener chatarra ligera para que sirva como colchón al fondo, mientras que las partes pesadas deben colocarse cuidadosamente en el centro. La chatarra ligera y mediana se colocará alrededor de las piezas pesadas para proteger las paredes y los bancos. Junto con la primera o segunda carga se puede poner trozos de lingoteras u otra chatarra de hierro, los cuales servirán para suministrar el carbono necesario para la fusión.

La fusión se inicia después de colocada la bóveda en su sitio, en esta etapa se usa por lo general un ajuste de mediana potencia, después de pocos minutos, la potencia se pone al máximo, cuando la chatarra se funde y pasa al estado líquido se extrae una muestra

para analizarla químicamente, si el análisis químico está dentro de lo especificado se continua con el proceso, si no es así, se procede a realizar ajustes en el análisis mediante la adición de ferroaleaciones. Cuando la carga ha sido refinada, se sangra el horno en una olla de vaciado, se toma la temperatura del metal líquido y se extrae una segunda probeta para análisis químico. Cuando la carga líquida está dentro de las especificaciones de vaciado se retira la escoria por medio de un rastrillo de madera y se prepara para su vaciado en el molde preparado con anterioridad. El proceso de fusión para núcleos o cáscara del rodillo es exactamente el mismo, lo que lo hace diferente es la aleación de elementos que lo componen [1-3].

4.5.3.- Centrifugado.

En el proceso de vaciado centrífugo los cuellos son moldeados en las cajas descritas anteriormente. El cuerpo se obtiene colando el metal fundido en un molde giratorio. La fuerza centrífuga crea presiones que exceden la gravedad para empujar el metal dentro del molde. Por ejemplo, una aleación de hierro que gira a cerca de 2600 rpm está sujeta a una presión aproximada de 250 kPa aproximadamente a 100 mm de diámetro y se incrementa a diámetros mayores. Esto es mejor que alimentar un colado estático con una columna de casi 9 m (30 ft). El colado centrífugo produce colados de buena calidad y ahorra material. Los colados son densos y tienen una estructura de grano fino con propiedades físicas altas y uniformes y están menos sujetos a las variaciones direccionales que los colados estáticos. El metal fluye con facilidad dentro de los moldes y los colados salen con detalle fino en la superficie exterior. Para el vaciado centrífugo de rodillos dobles, se requieren velocidades superiores a las 700 rpm, el primer paso consiste en depositar el metal duro en la tolva de vaciado instalada en el centro del molde que ha sido colocado previamente en posición inclinada, después de un determinado tiempo de solidificación se vacía el metal suave que forma el núcleo del rodillo, por último se le da el tiempo suficiente para que inicie la solidificación y el molde vaciado se posiciona de manera vertical y se deja reposar en una fosa de vaciado en donde la pieza terminará de solidificar y se enfriará a la temperatura requerida [1,3,4].

4.5.4. – Desmoldeo y rebabeo.

El proceso de desmoldeo consiste en separar la pieza sólida del molde, para el caso específico de los rodillos de laminación esta actividad es irrelevante ya que el proceso consiste en golpear con una pieza de acero en la parte exterior del molde para que la arena compactada se fracture y permita el deslizamiento del rodillo vaciado. Una vez que el rodillo ha sido extraído del molde se procede a limpiar la arena que queda pegada en la superficie de la pieza y con un esmeril se eliminan las pequeñas rebabas u otro tipo de defecto que pudieron haberse formado durante el proceso de vaciado [3].

4.5.5. – Tratamiento térmico.

El tratamiento térmico tiene por objeto mejorar las propiedades y características del acero y consiste en calentar y mantener las piezas a temperaturas adecuadas durante cierto tiempo, enfriándolas después en condiciones convenientes. De esta forma se modifica su estructura y se verifican transformaciones físicas que incrementan la vida de los rodillos. En todo tratamiento térmico hay que distinguir tres periodos fundamentales que son:

- a) Velocidad de calentamiento.
- b) Permanencia a temperatura.
- c) Velocidad de enfriamiento.

a) Velocidad de calentamiento. A la velocidad de calentamiento en muchas ocasiones no se le suele dar importancia, generando un grave error ya que tiene la suficiente importancia para dedicarle atención, como en el caso de la producción de rodillos, que son piezas de gran sección. El calentamiento debe de ser lo más uniforme posible y debe de llegar hasta el corazón de la pieza. Debe de calentarse lentamente para que haya la menor diferencia de temperatura posible entre el interior y la periferia, pues en caso contrario se pueden crear fuertes tensiones internas que pueden dar lugar a grietas o

fracturas. Estas tensiones se crean primero por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías (periferia y centro) y luego por las contracciones que ocurren al pasar el acero por las zonas críticas de transformación.

El paso de la zona crítica no es peligroso cuando todo el rodillo tiene la misma temperatura o las diferencias son muy pequeñas, como ocurre con los calentamientos lentos. En cambio, cuando la periferia alcanza la temperatura mucho antes que el centro, la zona periférica sufre contracción, mientras que el centro que no ha llegado a esa temperatura y se está dilatando todavía incrementa el riesgo de agrietamiento, algunos de estos defectos aparecen después en el temple y revenido, atribuyéndose indebidamente a causas distintas a las que se originan.

Las dimensiones de las piezas están en función tanto de la capacidad de un horno para calentar un rodillo y llevarlo a la temperatura deseada, tomando en cuenta su conductividad térmica y su composición química. Por lo común, un horno de tratamiento térmico consta de una estructura parecida a una caja envolvente de acero y una puerta de acceso, revestimiento refractario, controles e indicadores de temperatura.

b) Permanencia a temperatura. La temperatura máxima que se debe alcanzar se indica en las especificaciones de cada tratamiento y los fabricantes precisan la más conveniente para cada clase de metal o aleación, a veces en márgenes muy estrechos. De ningún modo debe de sobrepasarse la temperatura indicada pues se corre el riesgo de aumentar innecesariamente el tamaño de grano de los constituyentes. Si la elevación de la temperatura es muy exagerada, cercana al punto de fusión, quedan los metales con una estructura gruesa y frágil, debido a la fusión de las impurezas que rodean los granos que, al solidificar quedan en forma de delgadas capas sin cohesión con los granos.

Este metal se dice que se ha quemado y es imposible regenerarlo por tratamiento térmico. Se calcula que la permanencia de uno o dos minutos por cada milímetro de espesor de la pieza es suficiente para conseguir la austenización completa en el acero.

c) Velocidad de enfriamiento. Está en función de la secuencia en el tiempo de varios cambios de temperatura del acero y de su composición química. Velocidades de enfriamiento críticas, temperaturas y tiempos de la transformación de la austenita, son características para cada acero, dependiendo de su composición química, tamaño de grano austenítico. Estos factores cinéticos no se ven en un diagrama de fase por lo tanto se usan los diagramas de transformación isotérmica o continua.

La presencia de los elementos de aleación modifican tanto las microestructuras de equilibrio como la característica de transformación. El tratamiento térmico utilizado para la producción de rodillos centrifugados es el temple y revenido. Algunos rodillos son especificados para cierto grado de dureza que se obtienen sólo mediante una aleación especial, seguidas de tratamiento de revenido que elimina los esfuerzos internos concentrados durante el proceso de vaciado [1,3,4].

4.5.6. - Maquinado.

El proceso de maquinado es la última operación en la fabricación de rodillos, consiste en obtener el contorno final del rodillo, apoyándose en máquinas herramientas para realizar esta operación. Las máquinas herramienta sirven a un propósito común, cortar y formar materiales, actualmente existen algunas maquinas modernas con las que se pueden obtener, en forma automática, tolerancias en sus acabados hasta de $2.5 \mu\text{m}$ (0.0001 in). En la producción de rodillos las máquinas más utilizadas son tornos, fresadoras y rectificadoras.

La operación de torneado representa el 50% del maquinado de rodillos, el proceso es sencillo, consiste en rebajar el material en diámetros exteriores de la pieza mientras se encuentra en rotación, creando un contorno circular utilizando una herramienta fija que se mueve en el carro sobre los ejes longitudinal y transversal.

Las herramientas de maquinado en los inicios del siglo XX consistían en piezas sólidas de acero alta velocidad, estas piezas se fijaban directamente en el portaherramienta de la máquina, una vez que se deterioraba el filo, con la ayuda de un esmeril, se volvía a afilar. Hoy en día, las herramientas de maquinado que predominan son los insertos de carburo con recubrimiento, fabricadas por metalurgia de polvos, las

cuales se sujetan en portaherramientas de acero, cuando su filo se acaba se quita, se gira para utilizarse otro filo y se vuelve a insertar en su posición, de allí viene el calificativo de inserto. Existen una gran variedad de geometrías y grados en el mercado y son aplicables para todo tipo de maquinado en el que se genera un arranque de viruta.

En los tornos se realizan actividades tales como centros provisionales muertos, centros originales muertos, preparación para inspección por ultrasonido, extracción de muestras para ensayos mecánicos y metalográficos, desbaste de espigas (semiacabado) dejando material excedente para dar el acabado final en rectificadoras.

Las superficies planas o curvadas, interiores o exteriores, de casi todas las formas y tamaños pueden maquinarse por fresado. Esta máquina está formada por una mesa de trabajo sobre la cual se coloca la pieza de trabajo, perpendicularmente se encuentran los cabezales que sostienen los husillos donde gira la herramienta cortante comúnmente llamada piña o fresa, la cual consiste en un cuerpo rotatorio circular con arreglo de dientes múltiples. Esta máquina está diseñada para generar superficies planas o con cierto contorno curvilíneo, como los son los planos de acoplamiento, cuñeros y taladros que forman parte del diseño de un cilindro de laminación.

Los acabados finos que se requieren en los diámetros de espigas y cuerpo se obtienen en máquinas rectificadoras cilíndricas, este tipo de máquinas pueden producir piezas rectas, cilíndricas, partes redondas con perfiles curvos. Una rectificadora cilíndrica simple consiste en un cabezal en el que gira una rueda de rectificado, la cual está montada en el carro transversal o en el soporte compuesto de un torno. La operación consiste en sostener la pieza de trabajo entre dos centros muertos, impulsada por un perro de arrastre colocado en el plato del cabezal de la máquina, los centros están sostenidos en el cabezal y en el contrapunto. El cabezal y el contrapunto están soportados en la bancada. La pieza de trabajo gira en sentido contrario a la rueda de rectificado, la cual se encuentra soportada en una flecha girando sobre cojinetes de ajuste muy estrecho para evitar la vibración. En la actualidad se han desarrollado máquinas rectificadoras muy sofisticadas para el maquinado de coronas en los cilindros de laminación, el control está gobernado por un programa de control numérico que tiene márgenes de error de $1.25\text{ }\mu\text{m}$ (0.00005 in). Estas máquinas cuentan además con detector de grietas o fisuras [3,5].

4.5.7. – Embalaje.

La última etapa en la producción de rodillos es la preparación para embarque, la cual requiere trato especial considerando que los rodillos son herramientas de operación muy costosas y de extremada precisión. Esta etapa consiste en cubrir completamente la pieza de grasa o un líquido equivalente para evitar la oxidación, recubiertos con hule o cartón autoadherible, en algunas ocasiones forrado de maderas atravesadas a lo largo de la pieza, las cuales se sujetan por flejado [3].

4.6. – ESPECIFICACIONES DE RODILLOS DE LAMINACION.

Para establecer las especificaciones de operación de los rodillos en los molinos actuales se requiere de mucha experiencia y un entendimiento completo de los diseños y operación de los molinos, así como la calidad del material y el producto que se está laminando.

Es difícil establecer un estándar en las especificaciones correctas de laminación, debido a la infinidad de variables presentes en el proceso. El rendimiento y desgaste de los rodillos varía ampliamente y depende de las condiciones de operación de los molinos. Cuando se realizan estudios para determinar el rodillo adecuado para operaciones específicas es necesario considerar algunos factores de operación básicos tales como [1,2]:

- a) Castillo o castillos donde se usan los rodillos.
- b) Porcentaje de reducción.
- c) Temperatura de laminación.
- d) Enfriamiento del rodillo.
- e) Temperatura del rodillo.
- f) Rendimiento del rodillo

4.6.1.- Castillos donde se usan los rodillos.

Un tren de laminación es un conjunto de por lo menos dos molinos que trabajan simultáneamente sobre una misma barra. En la actualidad no existen plantas laminadoras de tira en caliente que trabajen con un tren de dos molinos, a excepción de algunos trenes para placa. Por lo general, en la actualidad el mínimo necesario para una producción aceptable en un molino de tira en caliente es de 6 castillos y el máximo no más de 11.

Por ello es lógico deducir que los rodillos para tantos molinos no podrán ser del mismo tipo de material y de igual dureza. Es lógico también, suponer que las condiciones de laminación no son las mismas a lo largo del tren.

Si se recuerda que uno de los fenómenos que caracterizan a la laminación es que la longitud de la barra aumenta en cada paso, entonces es fácil suponer también que las velocidades de los rodillos deberán de ir aumentando en cada molino hacia el acabador, para desahogar el incremento de longitud [1,2].

4.6.2.- Porcentaje de reducción.

El fenómeno de reducción es una característica muy importante en el proceso de laminación, consiste en una disminución del área transversal de la barra en cada paso, esta reducción se realiza por medio de la fuerza aplicada a los rodillos, por lo que se supone que para reducciones mayores se necesitará más carga y cuando se aplican cargas mayores, se requieren rodillos más resistentes [1].

4.6.3.- Temperatura de laminación.

La temperatura de proceso es uno de los parámetros principales que se deben de considerar para la asignación de un rodillo de laminación. Considerando un tren de laminación en caliente, es fácil deducir que si la temperatura de la barra en el primer paso es de 1200°C, en el último no podrá ser igual o mayor, necesariamente tendrá que ser mucho menor.

Por lo tanto es lógico pensar que los rodillos de desbaste no podrán ser del mismo material que los rodillos acabadores ya que no trabajan bajo las mismas temperaturas de operación [1].

4.6.4.- Enfriamiento del rodillo.

La laminación es un proceso en el que están involucrados cuerpos en movimiento, como resultado de este movimiento se crean fricciones entre los rodillos y la barra. Estas fricciones significan producción de calor, la velocidad de laminación implica también generación de calor. La reducción produce fricción y a mayor reducción mayor fricción y mayor generación de calor, la elongación es un resultado de la reducción y está acompañada del deslizamiento del material de la barra contra el rodillo, generando a su vez otra cantidad de calor, igualmente sucede con el ensanchamiento. Así que por lo anterior se puede concluir que el enemigo número uno de los rodillos es la temperatura.

Todas esas temperaturas de que se habla se desarrollan en una pequeña zona del rodillo a la cual se llamará arco de contacto o área de contacto de los rodillos con la pieza de trabajo. En esta pequeña zona la temperatura de la superficie del rodillo llega a elevarse en forma súbita a valores de hasta 500°C y en ocasiones hasta por arriba de los 1400°C, de manera que la barra puede quedar soldada al rodillo por fusión, estos casos presentan cuando ocurren atorones en los molinos.

Estas temperaturas desde luego bajan la dureza superficial de los rodillos durante el paso de la barra por el arco de contacto, provocando lo que se pudiera llamar un recocado de la superficie. Por esta razón es tan importante el enfriamiento.

La temperatura es el mayor enemigo de la vida de trabajo de los rodillos durante la laminación, sea ésta caliente o fría, por razón inherente al proceso la única forma de minimizar sus efectos es con el enfriamiento. Desde que se demostró que el enfriamiento afecta positiva y grandemente la vida de trabajo de los rodillos, es natural que se hayan efectuado muchas investigaciones para encontrar la mejor forma de aplicar ese enfriamiento y extender al máximo la vida del rodillo.

El enfriamiento de los rodillos consiste en aplicar un refrigerante en todo el cuerpo del rodillo, el cual está distribuido en tres secciones compuestas por boquillas. Estas secciones deberán de formar un arreglo asimétrico. La separación de las boquillas en cada sección se recomienda que varíe entre 5 y 8 cm para obtener máxima eficacia [1].

4.6.5.- Temperatura del rodillo.

Las investigaciones más aceptables para disminuir los efectos de la temperatura son aquellas que se basan en las lecturas tomadas de la temperatura al momento que está pasando por el arco de contacto. Se comprende que es muy difícil hacer mediciones y comprobaciones de las condiciones, causas y efectos en el arco de contacto cuando pasa la pieza de trabajo. Algunas de estas causas y efectos son imposibles de cuantificar y deben de ser estimadas.

El resultado de las variaciones cíclicas de temperatura aplicadas repentinamente a la superficie es precisamente lo que se llama fatiga térmica, la cual produce el deterioro en la superficie del rodillo y eventualmente, su ruptura [1].

4.6.6.- Rendimiento del rodillo.

En la laminación hay varios términos para describir el rendimiento de un rodillo, comúnmente se le conoce como la vida de un rodillo. Algunos laminadores aumentan el diámetro de sus rodillos para sacarles un poco más de vida, esto hace suponer que definen la vida del rodillo como la diferencia entre la medida del diámetro original y la medida del diámetro de descarte.

Cualquier término que se utilice para describir el rendimiento de un rodillo implica desgaste en el material del rodillo. Las causas para que el rodillo se desgaste son múltiples y pueden atribuirse a la inestabilidad en las condiciones de laminación, como pueden ser variaciones en la temperatura de la pieza, variaciones en las reducciones, entrada de la pieza fuera de centro, enfriamiento ineficiente, paros, etc, [1].

4.7. – INSPECCION Y PRUEBAS APLICADAS A RODILLOS DE LAMINACION.

Los ensayos o pruebas se utilizan para asegurar la producción de productos confiables, seguros y económicos. Aumentar la confiabilidad mejora la imagen pública del fabricante, que conduce a mayores ventas y ganancias. Además de lo anterior, los fabricantes recurren a estas pruebas para mejorar y controlar los procesos de fabricación.

El uso de ensayos ha tenido mucho auge después de la segunda guerra mundial, las pruebas mecánicas y los ensayos no destructivos no eran muy importantes, debido a los grandes factores de seguridad introducidos en casi todos los productos que se fabricaban.

Para evaluar la calidad de los rodillos de laminación o prevenir posibles fallas, se realizan varias pruebas e inspecciones durante el proceso de fabricación, existe una amplia variedad de ensayos que garantizan la confiabilidad de los productos vaciados, entre los ensayos más comunes se pueden mencionar al análisis químico, metalografía, dureza, tensión, compresión, impacto, fatiga. Estas pruebas son estandarizadas y requieren de una probeta para su análisis. Existen sin embargo los ensayos o pruebas no destructivas, las cuales aunque no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosas para localizar defectos en los materiales que podrían afectar el funcionamiento de una pieza cuando entra en servicio. Los ensayos o pruebas no destructivas que se aplican en la producción de rodillos son inspección por penetración fluorescente o líquidos penetrantes e inspección ultrasónica [1].

4.7.1- Análisis químico.

Hace aproximadamente 30 años más del 90% de los análisis químicos de los metales para los rodillos se realizaban utilizando algunos métodos químicos clásicos, en el cual se utilizaban balances analíticos, frascos volumétricos, pipetas, etc. En la actualidad más del 90% de los análisis químicos se desarrollan en laboratorios que cuentan con mecanismos completamente automáticos, proporcionando una gran cantidad de elementos químicos en menos de 2 minutos. Con dispositivos como la microsonda electrónica se puede analizar las fases individuales en la muestra. El procedimiento está relacionado con el uso de rayos X, un pequeño haz de electrones se enfoca en la fase

particular y esto hace que los átomos de los elementos que se encuentran presentes emitan rayos X. Ya que cada elemento emite rayos X de su longitud de onda característica, solamente se requiere registrar este espectro en forma similar como el espectro visible se registra en un espectrógrafo. El porcentaje de un elemento dado en la fase está relacionado con la intensidad de la radiación de su longitud de onda característica [1].

Hoy en día existen aparatos en laboratorios que utilizan éstos principios desarrollados por el comité ASTM para realizar análisis químicos relacionados con la producción de rodillos. Los estándares que aplican en el análisis químico de los metales son los siguientes:

- ASTM E59. Método para la prueba de hierros y aceros, determinación de análisis químico [6].
- ASTM E350. Método para el análisis químico de aceros al carbón y aceros baja aleación [6].
- ASTM E351. Método para el análisis químico de hierros fundidos. Todo los tipos [6].

4.7.2.- Metalografía.

La metalografía estudia las características microestructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano y el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es relativamente sencillo y

requiere de una técnica desarrollada sólo después de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejantes a un espejo.

Las muestras pequeñas o de forma incómoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Los materiales plásticos sintéticos que se acoplan a la muestra en una prensa para montaje especial proporcionan las bases de un tamaño uniforme conveniente (generalmente de 2.5, 3, ó 4 cm de diámetro) para manipular las muestras en ulteriores operaciones de pulido. Estas bases, cuando se han hecho en forma adecuada, son muy resistentes a la acción de los reactivos de ataque que se emplean comúnmente.

Después de montada, la muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos cada vez más finos. El primer papel es generalmente No. 1, luego 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente 4/0.

Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves se puede usar un abrasivo de carburo de silicio y agua como lubricante.

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo. La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio, parece haber preferencia por la forma gama del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos. Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el gamal y el micropaño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida en forma adecuada mostrará únicamente las inclusiones no metálicas y estará libre de ralladuras.

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en la preparación, pulido, ataque y evaluación de microestructuras, los estándares que aplican en la producción de rodillos son las siguientes:

- ASTM E3. Método de preparación de probetas metalográficas [7].
- ASTM E112. Método de prueba para determinar tamaño de grano promedio [7].
- ASTM A247. Evaluación de microestructuras, grafito en hierro fundido [7].

4.7.3.- Dureza.

Es la resistencia al rasgado o rayadura, con este ensayo se puede obtener una idea parcial de las propiedades mecánicas del material analizado. La dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resulta generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza de un tratamiento térmico a un material dado por el proceso determinado, esa estimación proporcionará un método rápido y sencillo de inspección y control para el material y proceso particulares. Las pruebas de dureza que se utilizan en la producción de rodillos son las de dureza elástica y de resistencia a la indentación.

DUREZA ELÁSTICA. Este tipo de dureza se mide mediante un escleroscopio, que es un dispositivo para medir la altura de rebote de un pequeño martillo con emboquillado de diamante, después de que cae por su propio peso desde una altura definida sobre la superficie de la pieza a prueba. El instrumento tiene por lo general un disco autoindicador tal que la altura de rebote se indica automáticamente. Cuando el martillo se eleva a su posición inicial tiene cierta cantidad de energía potencial. Cuando se libera la energía estática se convierte en cinética hasta que golpea la superficie de la pieza a prueba. Alguna energía se absorbe al formar la impresión y el resto regresa al martillo al rebotar éste. La altura de rebote se indica por un número sobre una escala arbitraria tal que cuanto mayor sea el rebote, mayor será el número y la pieza a prueba será más dura. Esta prueba es realmente una medida de la resiliencia del material, o sea, la energía que puede absorber en el intervalo elástico. Actualmente la dureza elástica se utiliza muy poco en la inspección de rodillos, sin embargo se siguen manejando las escalas de dureza Shore como bases para establecer las características deseadas.

RESISTENCIA A LA INDENTACION. Esta prueba generalmente es realizada imprimiendo en la muestra, lo que está en reposo sobre una plataforma rígida, un marcador o indentador de geometría determinada, bajo una carga estática conocida que se aplique directamente o por medio de un sistema de palanca. Dependiendo del sistema de prueba, la dureza se expresa por un número inversamente proporcional a la profundidad de la indentación para una carga y marcador especificados, o proporcional a una carga media sobre el área de mella. El método más común para la prueba de dureza por indentación aplicada a rodillos de laminación es el de dureza Rockwell, el cual se describe enseguida.

PRUEBA O ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL. En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basada en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador hasta que se ha aplicado una carga determinada menor. Esto se indica en el disco medidor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor y con la

carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor. Como el orden de los números se invierte en el disco medidor, una impresión poco profunda en un material blando dará un número pequeño.

Hay dos máquinas Rockwell. El probador normal para secciones relativamente gruesas y el probador superficial para secciones delgadas. La carga menor es de 10 kg en el probador normal y de 3 kg en el probador superficial.

Pueden utilizarse diversos marcadores de muescas y cargas y cada combinación determina una escala Rockwell específica. Los marcadores de muescas incluyen esferas de acero endurecido de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 de pulgada de diámetro y un marcador cónico de diamante de 120°. Generalmente las cargas mayores son de 60, 100 y 150 kg en el probador normal y de 15, 30 y 45 kg en el probador superficial.

Las escalas Rockwell empleadas más comúnmente son la B (marcador esférico de 1/16 de pulgada y 100 kg de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg de carga), ambas obtenidas con el probador normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala y precedido de los números de dureza, por ejemplo, 82 HRB significa una dureza de Rockwell de 82 medida en la escala B.

El funcionamiento de la máquina debe ser verificado frecuentemente con bloques de prueba estándar proporcionados por el fabricante. La manija para quitar la carga mayor puede producir un error de varios puntos en el disco de indicación. Se debe tener cuidado de asentar firmemente el yunque y el marcador. Cualquier movimiento vertical en estos puntos resulta en un registro de una profundidad adicional en el medidor y, por tanto, en una lectura de dureza falsa [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en las pruebas de durezas aplicados en los materiales metálicos, de los cuales se pueden nombrar los siguientes:

- E18 Dureza Rockwell y dureza Rockwell superficial de materiales metálicos [7].
- E448 Ensayo de dureza en escleroscopio para materiales metálicos [7].

En los últimos años, ha surgido una nueva escala para inspección de durezas o resistencia a la indentación, la cual ha tenido mayor aplicación debido a la sencillez con que se desarrolla el ensayo. Además de que el aparato con que se toman las lecturas permite comparar la escala EQUOTIP con el resto de las escalas establecidas por la ASTM e inclusive con la dureza elástica estandarizada también por la ASTM.

El equipo con el que se toman las lecturas es el EQUOTIP y maneja varias escalas, dentro de las cuales la escala LD es la que se aplica para la producción de rodillos de laminación [1].

4.7.4.- Tensión.

Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una muestra o probeta preparada específicamente se coloca en las mordazas de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga, mecánica o hidráulica. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide por medio de un disco medidor llamado extensómetro. Entonces, la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta. En algunos casos, puede utilizarse un medidor electrónico para medir la deformación total.

La gráfica esfuerzo-deformación muestra la relación entre esfuerzo unitario y deformación unitaria, encontrados experimentalmente. Las propiedades mecánicas que normalmente se utilizan en la fabricación de rodillos y se obtienen por medio del ensayo de tensión son la resistencia al límite elástico, resistencia a la ruptura y módulo de elasticidad o de Young [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los ensayos de tensión, el cual se clasifica por E8 Ensayo de tensión en materiales metálicos [7].

4.7.5.- Compresión.

Teóricamente el ensayo de compresión es meramente lo contrario al ensayo de tensión, con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado. Las razones generales para la elección de uno u otro tipo de ensayo dependerán de los resultados esperados. Asimismo, los principios generales para el ensayo de tensión son los mismos que para el de compresión. Existen, sin embargo, varias limitaciones especiales del ensayo de compresión a las cuales se debe de dirigir la atención.

1. - La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial.
2. - El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga tensil. Existe siempre una tendencia al establecimiento de esfuerzos flexionantes y a que el efecto de las irregularidades de alineación accidentales dentro de la probeta se acentúa a medida que la carga prosigue, para eliminar este problema se debe de respetar la relación D/h (diámetro/altura) establecida en el standard.
3. - La fricción entre los puentes de la máquina de ensayo o las placas de apoyo y la superficie de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de ésta. Esto puede alterar considerablemente los resultados que se obtendrían si tal condición de ensayo no estuviera presente.
4. - La relación que existe entre las dimensiones de la probeta con la capacidad de la máquina. Esto se traduce en la necesidad de una máquina de ensayo de capacidad relativamente grande o probetas pequeñas y por lo tanto resulta difícil obtener de ellas mediciones de deformación de precisión adecuada [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los ensayos de compresión, el cual se clasifica por E9 Ensayo de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente [7].

4.7.6.- Inspección por líquidos penetrantes.

Este es un método de inspección sensible no destructivo con el que se pueden detectar pequeñas discontinuidades como fisuras, contracciones y porosidades que se encuentran en la superficie de la pieza. Se puede recurrir a varias técnicas penetrantes para revisar cualquier material homogéneo que no sea poroso.

Las partes que van a analizarse se tratan primero con un trazador o colorante que es la sustancia que penetra en las fisuras. Por lo general, los trazadores son líquidos ligeros, de apariencia aceitosa que se aplican a la prueba por inmersión, rociado o con una brocha, o de alguna otra manera conveniente. El trazador es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que el trazador ha tenido tiempo de filtrarse, los residuos restantes sobre la superficie se limpian o se lavan. Esto permite al trazador permanecer en todas las discontinuidades que afloran a la superficie. A continuación, la pieza que se está revisando se trata con un polvo seco o una suspensión de polvo en un líquido. Este polvo o revelador actúa como una esponja que atrae al trazador fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación. A fin de que el proceso de inspección sea eficaz, el trazador debe de ser observado fácilmente en el polvo revelador. Un método para facilitar la inspección es usar colores contrastantes para el trazador y el revelador. Una combinación muy común es utilizar un revelador blanco y un colorante rojo.

Otro método consiste en utilizar un trazador fluorescente, la aplicación de este trazador es igual, excepto que el líquido penetrante contiene un material que emite luz visible cuando se expone a una radiación ultravioleta. Las lámparas que emiten luz ultravioleta se llaman lámparas negras, porque la luz visible que podrían emitir normalmente es detenida por un filtro, haciéndola aparecer negra o púrpura oscuro. Cuando la pieza que va a ser analizada se observa bajo la luz negra, el defecto aparece como una marca fluorescente que brilla contra un fondo negro [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los análisis de materiales por líquidos penetrantes. En la fabricación de rodillos se aplican los estándares siguientes:

- E1209 Método estándar para examinar líquidos penetrantes utilizando el proceso de lavado con agua [8].
- E1210 Método estándar para examinar líquidos penetrantes utilizando el proceso de emulsión [8].

4.7.7.- Inspección ultrasónica.

Un método muy antiguo es utilizar ondas de sonido para determinar defectos. Si una pieza de metal es golpeada con un martillo, producirá ciertas notas audibles, las cuales pueden alterarse en resonancia y tono por la presencia de imperfecciones internas. Sin embargo, esta técnica de golpear con el martillo y escuchar el sonido correspondiente es útil sólo para detectar grandes defectos.

Un método más depurado consiste en utilizar ondas de sonido fuera del intervalo auditivo, con una frecuencia de 1 a 5 millones de Hz, de aquí el término ultrasónico. El método ultrasónico es una prueba no destructiva, confiable y rápida que emplea ondas sonoras de alta frecuencia producidas electrónicamente que penetran metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de metros por segundo. Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico. Si se aplica un campo eléctrico alterno a un cristal piezoeléctrico, el cristal se expandirá durante la primera mitad del ciclo y se contraerá cuando el campo eléctrico se invierta. Al variar la frecuencia del campo eléctrico alterno, se puede variar la frecuencia de la vibración mecánica (onda sonora) producida en el cristal. El cuarzo es un transductor ultrasónico ampliamente utilizado. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra.

Los dos ensayos ultrasónicos más comunes son la transmisión continua y el eco pulsos. La transmisión continua utiliza un transductor en cada lado del objeto que va a inspeccionarse. Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico de frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado. El transductor de recepción situado en el lado opuesto recibe las vibraciones y

las convierte en una señal eléctrica que se puede amplificar y observar en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio, un medidor o algún otro indicador. Si la onda ultrasónica viaja a través de la muestra sin encontrar ninguna imperfección, la señal recibida será relativamente grande. Si hay imperfección en la trayectoria de la onda ultrasónica, parte de la energía se reflejará y la señal que recibirá el transductor de recepción se reducirá.

El método de eco-pulso utiliza sólo un transductor que sirve como transmisor y como receptor. Conforme la onda sonora penetra en el material sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta al cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico. Este impulso se amplía y hace visible, apareciendo como una indicación o señal sobre la pantalla del osciloscopio. Cuando la onda sonora alcanza el otro lado del material, se refleja de regreso al cristal y se ve como otra señal sobre la pantalla hacia la derecha de la primera señal. Si hay imperfección entre las superficies frontal y posterior del material, se delatará sobre la pantalla como una tercera señal entre las dos indicaciones correspondientes a las superficies frontal y posterior. Como las indicaciones en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde las superficies frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material. Por tanto, la localización de un defecto puede determinarse con exactitud por la indicación que aparece sobre la pantalla.

En general, las superficies uniformes y lisas son más apropiadas para la prueba de pulsos de mayor frecuencia; por tanto permiten detectar defectos más pequeños. La transmisión adecuada de la onda ultrasónica tiene gran influencia en la confiabilidad de los resultados de la prueba. Para partes de mayor tamaño, una película de aceite asegura el contacto apropiado entre la unidad del cristal de búsqueda y la pieza a prueba. Las piezas más pequeñas pueden colocarse en un tanque con agua, aceite o glicerina. La unidad de cristal de búsqueda transmite ondas sonoras a través del medio y penetran el material que se examina. Un estrecho examen de la pantalla del osciloscopio de esta gráfica permitirá ver la presencia de tres señales. La señal de la izquierda indica el frente de la pieza, la de la derecha la parte posterior de la pieza y la señal más pequeña del centro indica una imperfección.

La inspección ultrasónica se utiliza para detectar y localizar defectos como cavidades de contracción (rechupes), vacíos o fisuras internas, porosidad y grandes inclusiones no metálicas [1].

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los análisis de materiales por ultrasonido. En la fabricación de rodillos se aplican los estándares siguientes:

- E317 Práctica estándar para evaluar las características del ultrasonido pulso-eco sin el uso de instrumentos electrónicos de medición [8].
- E494 Práctica estándar para medir la velocidad del ultrasonido en materiales [8].
- E797 Práctica estándar para medir espesores apoyándose en el manual de ultrasonido pulso-eco, método de contacto [8].

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Robert B. Corbett, Rolls for the metalworking industries Rev. 2, Iron and Steel Society, Warrendale, Estados Unidos de America, 2002.

- [2] United States Steel Corporation, The making, shaping and treating of steel, Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos de America, 1996.

- [3] Grupo Sidenor, Aços Villares S.A de C.V, Sao Paulo, Brasil, 2005.

- [4] Karl – Erick Thelning, Steel and its Heat Treatment. Editorial Cox & Wyman, Inglaterra 1975.

- [5] Lawrence E. Doyle, Materiales y procesos de manufactura para ingenieros, Editorial Prentice Hall, México D.F, 1988.

- [6] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.05, Steel Products, ASTM, Pensilvania, Estados Unidos de America, 1991.

- [7] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Steel Products, ASTM, Pensilvania, Estados Unidos de America, 1991.

- [8] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.03, Steel Products, ASTM, Pensilvania, Estados Unidos de America, 1991.

CAPITULO 5

MODELOS MATEMATICOS DE DESGASTE.

5.1 INTRODUCCION.

No existe un modelo universal de desgaste que permita explicar dicho fenómeno. Esto se debe al gran número de parámetros implicados, tanto de base física como ligados al sistema de estudio. El comportamiento de los materiales en sistemas tribológicos depende, entre otros, del tipo de contacto, los niveles de tensiones mecánicas aplicadas, la temperatura y la naturaleza del entorno, así como de la geometría del sistema. Por tanto, el desgaste es esencialmente una respuesta del sistema estudiado más que del material que se desgasta.

En algunas ocasiones aparecen estudios que ligan de forma proporcional la dureza de un material con su resistencia al desgaste. Si bien la dureza y el desgaste están muy relacionados y en algunos sistemas existe una correspondencia proporcional, la resistencia al desgaste de dos materiales con diferentes microestructuras y propiedades mecánicas puede ser completamente diferentes, por tanto se debe de ser escéptico con las generalizaciones en el campo del desgaste. Además, pequeñas variaciones en la carga, velocidad o geometría del sistema pueden dar lugar a transiciones en el comportamiento del desgaste. Aunque esto ocurre en ciertas condiciones, el sistema exhibe generalmente un comportamiento estable fuera de estas zonas de transición.

Una posible vía para el ordenamiento y análisis de toda esta complejidad es la construcción de los llamados mapas de mecanismos de desgaste. Estos mapas resumen datos y modelos de desgaste, mostrando el mecanismo dominante para unas condiciones identificadas, así como la situación de las zonas de transición. Existen también expresiones que permiten describir el comportamiento del sistema en las situaciones de comportamiento estable. Estas expresiones empíricas relacionan al desgaste con parámetros de diseño, como la carga, la geometría o el recorrido del sistema. Al ser expresiones empíricas, estas funciones son la base de diferentes modelos ingenieriles del desgaste. Aunque dichos modelos tienen una amplia aplicabilidad, los coeficientes de las

expresiones usadas no son generales, sino que dependen del sistema tribológico estudiado. Por ello, dichos coeficientes deben de ser determinados experimentalmente para cada sistema tribológico estudiado, y no pueden obtenerse únicamente por consideraciones teóricas [1].

5.2 AREA DE CONTACTO.

El estudio del área real de contacto es una parte integral de la ciencia de la fricción y el desgaste. Es conocido que las superficies de los cuerpos sólidos no son idealmente lisas. Al maquinar los materiales de ingeniería o al obtener superficies directamente de otros procesos tecnológicos, aparecen en la superficie micro relieves o rugosidad superficial. Durante la fricción estos micro relieves no desaparecen, aunque experimentan cambios, se reconocen dos tipos de desviaciones de perfil de la superficie ideal: la rugosidad superficial y la ondulación.

Cuando dos superficies reales entran en contacto, éste no es continuo, y sólo ciertas partes de la superficie soportan la carga aplicada. La suma de estas áreas discretas de contacto forman el área real de contacto (A_r). De acuerdo con esto, el área real de contacto define las partes de la superficie donde existe una fuerte interacción entre los cuerpos. Consecuentemente, si otros factores se mantienen, la fuerza de fricción estará directamente relacionada con el área de contacto.

El daño superficial de los sólidos durante el deslizamiento (desgaste) está también estrechamente relacionado con la magnitud del área real de contacto, ya que los elementos sometidos a esfuerzos en las capas cercanas a la superficie se determinan por las dimensiones de dicha área. La generación del área en función de la carga aplicada ocurre como resultado de la penetración o aplastamiento de las micro asperezas individuales. La determinación de la deformación de contacto es importante para calcular el área real de contacto. Se ha determinado que bajo las cargas generalmente usadas en ingeniería, las deformaciones que se desarrollan en la región de contacto son fundamentalmente responsables en establecer los cambios en las posiciones mutuas de los componentes interactuantes.

La mecánica del medio deformable no ha alcanzado la etapa del desarrollo de modelos que puedan ser usados para explicar las leyes que gobiernan la fricción y el desgaste. A fines del siglo XIX, Hertz[2] resolvió el problema del contacto con su teoría de la elasticidad en la compresión de dos cuerpos idealmente lisos con un contacto primario a lo largo de una línea o en un punto. Estos resultados fueron ampliamente usados en el cálculo del área real de contacto. En 1939, Bowden y Tabor [10] publicaron resultados que jugaron un papel importante en revelar el mecanismo que gobierna la formación del área real de contacto y brindaron los primeros datos empíricos de sus dimensiones, con un método de conductividad eléctrica para establecer que el área real de contacto A_r varía en proporción directa a la carga aplicada N . Este resultado fue interpretado como un indicador condicional de la existencia de contacto plástico. A mediados del siglo XX enfocaron su atención a la adhesión como una de las causas principales de la fricción, encontrando que la adhesión y la deformación de las superficies de los materiales son muy importantes en la disipación de energía en el fenómeno de fricción, la teoría de adhesión en la fricción es atribuida a Bowden y Tabor [10], aunque recientemente se ha comprobado que ellos no fueron los primeros, ellos aportaron soporte de esta evidencia para incluir la deformación plástica en las superficies rugosas y demostraron que las propiedades mecánicas de la superficie del material es también muy importante. En sus trabajos más recientes Bowden y Tabor [10] concluyen que las microasperezas se deforman por flujo plástico y alcanzan una presión de contacto igual al de la dureza de indentación del material; para lo cual el área de contacto elástico es entonces determinada por [1]:

$$A_r \approx N^{2/3} \quad (5.1)$$

Este resultado fue generalizado para aplicaciones prácticas en todos los casos de contacto metálico, llegándose a la ecuación:

$$\sigma_t = N/A_r \quad (5.2)$$

donde σ_t es el esfuerzo de fluencia del material blando y N es la carga aplicada. Debe tenerse en cuenta el hecho de que σ_t puede variar en relación con la configuración de las microasperezas y el tipo de deformación (aplastamiento o penetración) de forma tal que la relación $\sigma_t = H$ es un caso especial quedando la ecuación anterior :

$$A_r = N/H \quad (5.3)$$

en donde A_r es el área real de contacto (en m^2), N la fuerza normal (en Newtons) y H la dureza (en N/m^2) [2].

En general todos los contactos pueden ser divididos dependiendo del tipo de deformación en: elástico, plástico, elastoplástico, viscoelástico, visoplástico e hiperelástico. Como las leyes para cada caso difieren, es importante conocer las condiciones bajo las cuales se obtiene un tipo particular de contacto.

En el caso de la penetración de una esfera rígida, la deformación plástica comienza cuando $p_0 = 2.76 \tau_y$, donde p_0 es la presión en el centro del área y τ_y es el esfuerzo tangencial límite. Así, la condición para el paso del contacto elástico al elastoplástico puede ser evaluado del criterio h/r , donde $h/r \geq 16 (\tau_y / E)^2$, donde h es la profundidad de la penetración, r el radio de curvatura de la esfera y E el modulo de elasticidad.

De acuerdo con Tabor [10], la penetración crítica puede ser determinada por la ecuación:

$$h_{cr} = 0.89 r H^2/E \quad (5.4)$$

A valores elevados de la carga específica, teniendo en cuenta el esfuerzo de fluencia del material, tiene lugar una interferencia de las zonas plásticas. A estas presiones el esfuerzo de fluencia efectivo de las esperezas varía, de forma tal, que el área real de contacto aumenta más lentamente con el incremento de la carga. En el contacto elástico el efecto mutuo de las regiones discretas cargadas lleva al crecimiento retardado del área de contacto con el incremento de la carga.

La rugosidad de la superficie forma su micro relieve y puede obtenerse una información de esto por varios métodos. Los parámetros de rugosidad más usados para

resolver los problemas de contacto son: la altura máxima del perfil de asperezas R_{\max} , el área curvada de asentamiento y el radio de curvatura del vértice de la aspereza.

Debido a la ondulación de la superficie, sólo una parte limitada del relieve toma parte en la formación del área real de contacto. Las asperezas que están en valles de la onda no son parte en la formación del área real de contacto y constituyen la parte del perfil que no trabaja. Para distinguir estas partes del perfil como un todo, en los problemas de fricción y desgaste surge el concepto de ondulación, que es caracterizada por la altura de la onda H_w y su radio R_w .

La naturaleza discreta del contacto es una característica de todos los contactos entre sólidos sin excepción y se refiere a su rugosidad superficial. La carencia de uniformidad en la distribución de los puntos de contacto no es tan característico, aunque siempre ocurre con contactos suficientemente extendidos y depende de la existencia de ondas en las superficies de los sólidos.

El área de contorno surge como resultado de los procesos de deformación que se concentran en las capas superficiales de los cuerpos en contacto y depende esencialmente de la carga y las propiedades mecánicas del material. El área de contorno es un área ficticia y es una fuente de transición entre el área nominal de contacto A_a y el área real de contacto A_r .

El concepto de área nominal de contacto no es nuevo. En el caso de contactos planos, es el área sobre la cual los cuerpos hacen contacto si tuvieran una superficie lisa ideal. En el caso de cuerpos con un contorno curvilíneo es el área donde entrarían en contacto dos cuerpos idealmente lisos del mismo contorno cuando se aplica una carga. Esta área surge de la deformación de los cuerpos (principalmente elástica).

El gran volumen de material experimental acumulado alrededor del área real de contacto permite esbozar los principios característicos del proceso y que son los siguientes:

- 1.-El contacto de las superficies rugosas tiene un carácter discreto.
- 2.-Los contactos elementales (puntos reales) surgen como resultado de deformaciones tanto elásticas como plásticas.
- 3.-El área real de contacto está relacionada por la ecuación:

$$A_r = C N^n \quad (5.5)$$

donde, C es una constante adimensional y $n = 1$ en el contacto plástico y muy cercano a 1 ($n \approx 0.8 / 0.9$) en el elástico.

- 4.- Con el incremento de la carga ocurre un aumento del área real de contacto debido principalmente a la aparición de nuevos puntos de contacto, el tamaño medio de los cuales permanece casi constante.

Muchas investigaciones posteriores ayudaron a refinar el mecanismo que gobierna la deformación de las microasperezas. Por ejemplo, Bowden y Tabor [10] estudiaron el fortalecimiento de un material durante la deformación y llegaron a la conclusión que durante el contacto plástico el exponente n bajo carga es igual a uno para materiales que no experimentan fortalecimiento o que los experimentan en una magnitud muy pequeña, y menor que uno en todos los otros casos.

Debe recordarse que el área de cada punto individual de contacto aumenta con la carga y que el tamaño medio del punto de contacto varía ligeramente debido al incremento del número de puntos de contacto. Partiendo del hecho que el coeficiente de fricción para procesos de laminación en caliente raramente excede de 0.3, el modelo establecido permite predecir un incremento en el área de contacto plástico, que no excede del 5%. Consecuentemente aún en el contacto plástico, la aplicación de fuerzas tangenciales a la unión entre dos cuerpos generalmente no llevan a cambios significativos en el área de contacto. En el contacto elástico la aplicación de fuerzas tangenciales llevan a cambios en el diagrama de esfuerzos y el desplazamiento del punto de esfuerzo tangencial máximo en la superficie de los cuerpos en contacto. Los cálculos estimados muestran que el incremento en el área de contacto elástico resultando de la aplicación de fuerzas tangenciales, como valores promedios de coeficiente de fricción, tampoco exceden de 5%. Siguiendo estas aproximaciones puede concluirse que los esfuerzos tangenciales en el contacto no llevan a cambios significativos en el área de contacto entre dos cuerpos rugosos. El incremento del área en deslizamiento es significativo sólo bajo condiciones especiales donde existe un elevado coeficiente de fricción. En este análisis no se ha tenido en cuenta los efectos de la velocidad de deslizamiento y de la temperatura y por tanto la aplicación de las conclusiones sería arriesgado hacerlo en todo tipo de proceso [1].

5.2.1 Contacto de superficies.

La Figura 5.1 muestra dos superficies que se encuentran en contacto en un solo punto, O. Por conveniencia, el punto O es tomado como origen en el eje de coordenadas rectangulares Oxyz. Por lo tanto el plano xy es el plano tangente a las dos superficies. La dirección de los ejes Ox y Oy coincide, donde es posible con los ejes de simetría del perfil de la superficie del plano xy. El perfil de cada superficie no deformada en la región cercana al origen puede ser expresada por:

$$z_1 = A_1 x^2 + B_1 y^2 + C_1 xy + \dots \quad (5.6)$$

donde los términos de orden más alto en x y y son omitidos. Escogiendo la orientación de los ejes x y y, x_1 y y_1 , de tal manera que el término en xy desaparezca, y la ecuación (5.6) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$z_1 = (x_1^2 / 2R'_1) + (y_1^2 / 2R''_1) \quad (5.7a)$$

donde R'_1 y R''_1 son los radios principales de curvatura de la superficie en el origen. Estos son los valores máximo y mínimo del radio de curvatura de todo corte transversal posible del perfil. Si existe un plano de corte transversal de simetría sólo un radio R_1 se encuentra en ese plano. Una expresión similar puede ser escrita para la segunda superficie:

$$z_2 = (x_2^2 / 2R'_2) + (y_2^2 / 2R''_2) \quad (5.7b)$$

La separación entre las dos superficies está dada por $h = z_1 - z_2$

Para una apropiada elección de ejes x y y, en un plano de simetría de corte transversal, h está dado por:

$$h = Ax^2 + By^2 = x^2 / 2R' - y^2 / 2R'' \quad (5.8)$$

donde $A = 1/2R'$ y $B = 1/2R''$. R' y R'' son definidos como los radios relativos de curvatura principales en el plano de corte transversal.

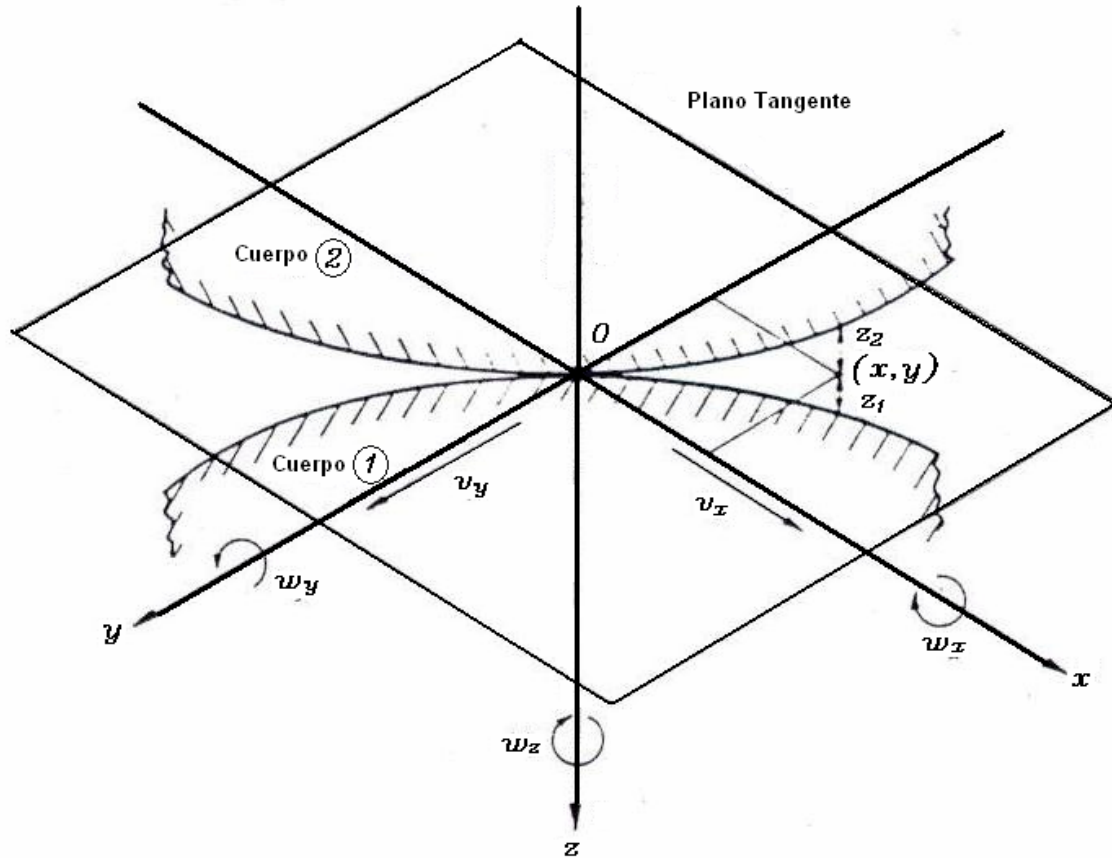


Figura 5.1 Superficies que están en contacto en el punto O [3].

Bajo una carga normal de compresión P , el punto de contacto entre los dos sólidos se expande en un área. Si los dos cuerpos en contacto son de revolución, entonces $A=B=1/2 (1/R_1 + 1/R_2)$. La Figura 5.2 muestra dos sólidos en corte transversal después de la deformación. Antes de la deformación la separación entre dos puntos de superficie correspondiente $S_1(x,y,z_1)$ y $S_2(x,y,z_2)$ está dada por la ecuación (5.8).

De la simetría respecto a O , la región de contacto se debe extender una distancia igual en cualquier lado de O . Durante la compresión los puntos distantes en los dos cuerpos T_1 y T_2 se mueven hacia O , paralelo al eje z por el desplazamiento δ_1 y δ_2 respectivamente.

Debido a la presión de contacto la superficie de cada cuerpo se desplaza en forma paralela a O-z por una cantidad U_{z1} y U_{z2} relativa a los puntos distantes internos T_1 y T_2 . Si, después de la deformación, los puntos S_1 y S_2 coinciden con la superficie de contacto entonces:

$$U_{z1} + U_{z2} + h = \delta_1 + \delta_2 = \delta \quad (5.9)$$

Utilizando la ecuación (5.8) el desplazamiento elástico está dado por:

$$U_{z1} + U_{z2} = \delta - Ax^2 - By^2 \quad (5.10)$$

donde x y y son las coordenadas comunes de S_1 y S_2 proyectadas en el plano x-y.

De la figura 5.2, $\delta_1 = U_{z1}(O)$ y $\delta_2 = U_{z2}(O)$, y poniendo $x=a$, y escribiendo $U_{z(O)} - U_{z(a)} = d$, la deformación en la zona de contacto se transforma en:

$$d_1/a + d_2/a = (a/2) (1/R_1 + 1/R_2) \quad (5.11)$$

Considerando que la deformación es muy pequeña $d \ll a$, el estado de esfuerzo en cada sólido es considerado por la relación d/a . Por consiguiente la magnitud del esfuerzo será proporcional a la presión de contacto actuando simultáneamente en cada sólido [3].

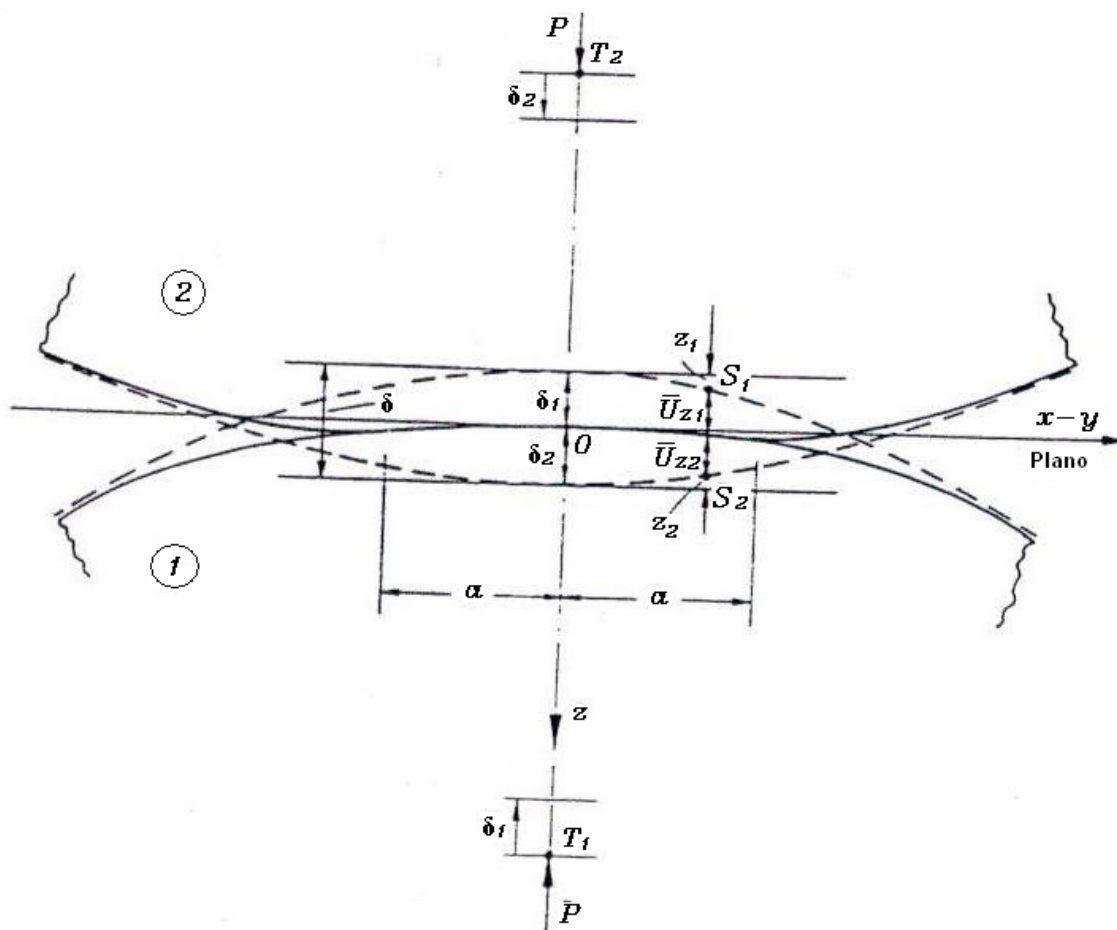


Figura 5.2.- Superficie en contacto después de sufrir deformación por medio de la carga aplicada P [3].

5.2.2 Teoría de contacto elástico de Hertz.

Hertz[3] desarrolló su teoría cuando estudiaba la influencia de la deformación elástica de dos superficies debido a la presión de contacto entre ellas. Hertz formuló la condición expresada en la ecuación (5.10) la cual debe de cumplir con los desplazamientos normales en la superficie de los sólidos. Para el cálculo de deformaciones locales cada cuerpo es considerado como un espacio elástico cargado sobre una pequeña región elíptica sobre la superficie plana.

Las consideraciones hechas en la teoría de Hertz son:

- a) Las superficies son continuas y no conformantes.
- b) Las deformaciones son pequeñas.

- c) Cada sólido puede ser considerado como espacio elástico.
- d) No existe fricción entre las superficies.

Para un sólido de revolución $A=B=(1/R_1 + 1/R_2)/2 = (1/R)/2$ y el área de contacto será circular, de tal manera que la condición límite para desplazamientos dentro del contacto expresada en la ecuación (5.10) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$U_z = U_{z1} + U_{z2} = \delta - r^2/2R \quad (5.12)$$

donde R es la curva relativa y r es el radio en coordenadas cilíndricas polares de un punto dentro del área de contacto como se muestra en la Figura 5.3 [3].

Otro planteamiento que vale la pena mencionar es el de Stolarski [4], quien utilizó un método en el que la distancia U es dada por:

$$U = R - R \cos \gamma \approx R - R (1 - \gamma^2/2 + \dots) \approx R\gamma^2/2 \approx r^2/2R \quad (5.13)$$

La simplificación surge al expandir $\cos \gamma$ a una serie y utilizar la observación de que $\gamma \approx r/R$ es muy pequeña.[4]

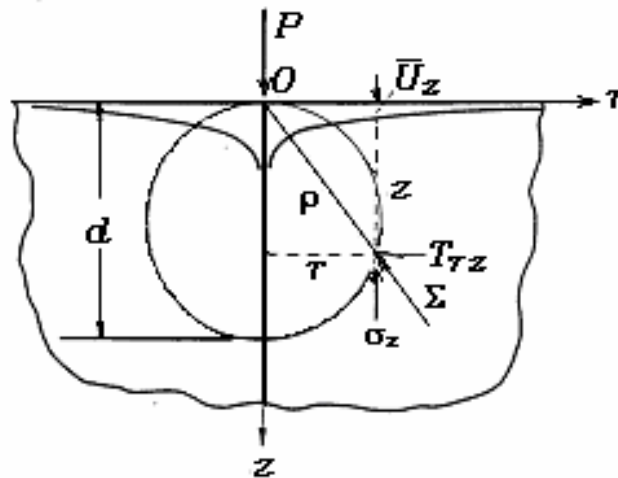


Figura 5.3 .- Superficie de deformación U_z en una distancia r desde una concentración de fuerza P actuando en el extremo de un cuerpo semi-infinito[3].

5.2.2.1 Presión aplicada en una sección circular.

Hertz propuso una distribución de presión la cual origina desplazamientos. Considerando la Figura 5.3, la deformación de la superficie U_z a una distancia r lejos de una fuerza concentrada actuando en el límite de un cuerpo semi-infinito se da por:

$$U_z = P(1 - \nu^2) / \pi E r \quad (5.14)$$

donde ν es la relación de Poisson y E es el módulo de elasticidad.

La principal consideración inherente en la ecuación (5.14) es que la distribución de los esfuerzos asociados con P es simétrica y sin torsión. Esto significa que no debe haber deformación dentro o fuera del plano en la Figura 5.3, pero habrá un movimiento hacia adentro de los puntos en la superficie dada por[3]:

$$w = -(1-2\nu) (1 + \nu) (1/2\pi E) (P/r) \quad (5.15)$$

La ecuación (5.14) es una confirmación de la deformación producida por una fuerza concentrada. Esta fuerza puede ser reemplazada por una distribución de presión como se muestra en la Figura 5.4. Por consiguiente el desplazamiento elemental en un punto C debido a un elemento de presión p en una distancia s desde C es:

$$dU_z = (1-\nu^2) (1/\pi E) p (dA/s) \quad (5.16)$$

La presión que actúa en el segundo cuerpo es igual a aquella que actúa en el primer cuerpo, de tal manera que definiendo un modulo de elasticidad efectivo E^* queda:

$$1/E^* = [(1-\nu_1^2)/E_1] + [(1-\nu_2^2)/E_2] \quad (5.17)$$

La ecuación (5.17) puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$dU_z = (1/E^*) (2p/\pi) (dA/s) \quad (5.18)$$

Integrando la ecuación (5.18) y utilizando la condición de contacto de la ecuación (5.12):

$$U_z = (2/\pi E^*) \iint p dA/s = a - (r^2/2R) \quad (5.19)$$

donde la doble integral implica una integral sobre el área de contacto, sobre toda la distribución de presión.

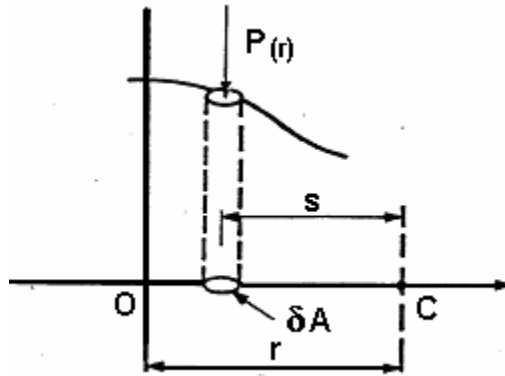


Figura 5.4.- Distribución de presión sobre una superficie deformada de un cuerpo semi-infinito [5].

La Figura 5.5 muestra una región circular de radio a . Se considera el desplazamiento en una superficie del punto M a una distancia r desde el centro de contacto. Cada elemento de la carga, $p dA$, contribuirá a la deformación en M, dependiendo de su distancia s , desde M. Con un sistema de coordenadas con centro en M y coordenadas polares s y θ , entonces el área elemental se convierte en $s ds d\theta$ y la ecuación (5.19) se convierte en:

$$U_z = (2/\pi E^*) 2 \int_0^{2\pi} \int_m p ds d\theta = a - (r^2/2R) \quad (5.20)$$

De las consideraciones físicas, la distribución de la presión debe de ser simétrica con un solo máximo existente en el centro del círculo de contacto en donde la deformación es máxima. La distribución hemisférica mostrada geoméricamente en la Figura 5.6 cumple con esta condición. Esta distribución hemisférica está dada por:

$$p = p_0 [1 - (r/a)^2]^{1/2} \quad (5.21)$$

donde p es la presión normal, p_o la máxima presión actuando en el punto O. Hertz [3] demostró que esta distribución de presión genera un desplazamiento normal U_z dentro del círculo de carga el cual está descrito por:

$$U_z = [(1-\nu^2)/E][(\pi p_o)/4a](2a^2-r^2), \text{ Cuando } r \leq a \quad (5.22)$$

Con la ecuación (5.22) y el módulo de elasticidad efectivo E^* dado en la ecuación (5.17) la ecuación (5.12) puede ser reescrita como:

$$(\pi p_o/4a E^*) (2a^2-r^2) = \delta - (1/2R) r^2 \quad (5.23)$$

En la que el radio del círculo de contacto es dado la ecuación (5.9):

$$a = \pi p_o R/2E^* \quad (5.24)$$

Y la aproximación mutua de los puntos distantes en los dos sólidos es dada por:

$$\delta = \pi a p_o/2E^* \quad (5.25)$$

La carga total que comprime los sólidos se relaciona con la presión mediante la formula:

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = (2/3) p_o \pi a^2 \quad (5.26)$$

Por consiguiente, la presión máxima p_o es 3/2 veces la presión media p_m . Las ecuaciones (5.24), (5.25) y (5.26) pueden ser reescritas en términos de la carga aplicada P .

$$a = (3PR/4E^*)^{1/3} \quad (5.27)$$

$$\delta = a^2/R = (9P^2/16RE^{*2})^{1/3} \quad (5.28)$$

$$p_o = 3P/2\pi a^2 = 6PE^{*2}/\pi^3 R^2)^{1/3} \quad (5.29)$$

El esfuerzo cortante principal τ_1 tiene un valor máximo, el cual está situado bajo la superficie:

$$\tau_{1 \text{ (max)}} = 0.31 p_o = 0.47 P/2\pi a^2 \quad (5.30)$$

5.3 DESCRIPCION DEL DESGASTE ABRASIVO.

El cálculo del desgaste se reduce a establecer una relación entre la intensidad del desgaste y las propiedades físicomecánicas de los materiales, las condiciones de carga y las características microgeométricas de la superficie deslizante. Es evidente que la relación entre estas cantidades dependerá del mecanismo específico del daño superficial. Sin embargo, en las etapas intermedias del cálculo es necesario considerar las variables del mecanismo de desgaste.

Para establecer una expresión cuantitativa que determine el desgaste abrasivo, se puede considerar un modelo simple en el cual las microasperezas en el material duro tiene una geometría cónica como lo muestra la Figura 5.7, inicialmente la superficie cónica mantendrá un incremento de carga ΔP , que produce una penetración en la superficie suave la cual está dada por:

$$\Delta P = H \Delta A \quad (5.31)$$

donde el incremento de área ΔA es πr^2 debido a que el área del cono se mantiene circular, quedando:

$$\Delta P = H \pi r^2 \quad (5.32)$$

despejando r^2 nos queda:

$$r^2 = (\Delta P / H \pi) \quad (5.33)$$

En donde H es la dureza de la superficie más suave.

El área proyectada del cono penetrado en un plano vertical es rh (donde r =radio del cono y h = profundidad de penetración). Entonces cuando el cono se mueve una distancia dx , éste desprenderá un volumen de material dV el cual está dado por:

$$dV = A dx = rh dx \quad (5.34)$$

Considerando que $\tan \theta = h/r$ y despejando $h = r \tan \theta$. Sustituyendo h en la ecuación anterior queda la ecuación:

$$dV = r^2 \tan \theta \, dx \quad (5.35)$$

Sustituyendo r^2 en la ecuación anterior queda como:

$$dV = \Delta P \tan \theta \, dx / H \pi \quad (5.36)$$

Integrando en ambos lados queda:

$$V = P x \tan \theta / H \pi \quad (5.37)$$

El ángulo del cono θ puede variar, para lo cual se puede considerar un ángulo promedio. Donde el coeficiente de desgaste abrasivo representa físicamente el promedio de este ángulo considerando su rugosidad, dividido entre π ($K_{abr} = \tan \theta / \pi$), quedando la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$V = K_{abr} P x / H \quad (5.38)$$

donde V es el volumen de material removido, K_{abr} es el coeficiente de desgaste abrasivo, L la carga aplicada, x la distancia recorrida y H la dureza del material más suave. Existen algunas tablas que definen los valores del coeficiente de desgaste de dos cuerpos, los cuales son ligeramente mayores a los coeficientes obtenidos para desgastes de tres cuerpos.

Mulhearn y Samuels [7] (1962) demostraron que para la ecuación (5.37) existe una simplificación en la cual para carburo de silicio típico, $\tan \theta$ tiene un valor aproximado de $1/3$ pero solamente $1/8$ de los granos esmerilados están en posición de cortarse, los otros granos soportan la carga pero no se cortan. Para este caso el valor de K_{abr} caerá de $(1/3) \times (1/8)$, lo que representa cerca del 4%. Buttery y Archard [7], encontraron una pequeña diferencia argumentando que siempre que un grano está en posición de cortarse solamente parte del material desplazado por abrasión es removido en forma de rebaba, mientras que el resto forman un par de montículos a lo largo de la ruta de desgaste [7].

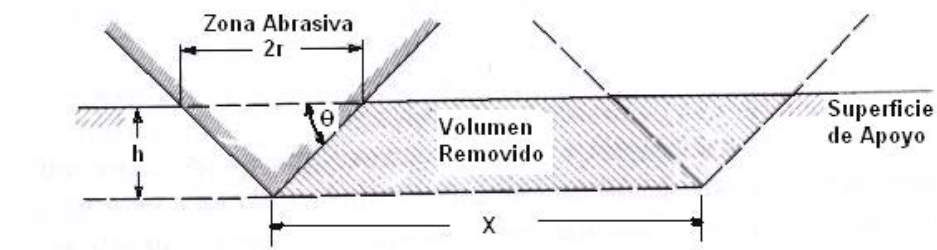


Figura 5.7.- Modelo de desgaste abrasivo mostrando el cono que remueve material de una superficie [7].

5.4 MODELOS MATEMATICOS EXISTENTES.

En los últimos años se han propuesto algunos modelos que actualmente se encuentran en operación con resultados satisfactorios para el proceso de laminación en caliente. Pero los modelos están diseñados exclusivamente para una industria en particular, entre la lista de modelos se encuentra el que aplica Oike [8] (1992), el cual estima que el desgaste se puede calcular mediante la ecuación [8]:

$$Cm = \alpha \sum_{j=1}^n \left[\frac{P_i}{w_i l_i} \right]^a (r_i l_i)^b \frac{L_i}{\pi D} \delta(z) \quad (5.39)$$

En donde:

Cm = Desgaste

$\delta(z) = 1$ Cuando $0 < z \leq w_i/2$

$\delta(z) = 0$ Cuando $z > w_i/2$

i = Numero de pases de rolado

n = Numero total de pases de rolado

P = Fuerza separadora

w = Ancho de la tira

l = Arco de contacto

r = Reducción

L = Longitud de la tira

D = Diámetro del rodillo de trabajo

α, a, b = Coeficientes empíricos que dependen del material laminado, temperatura de la lámina, lubricación, enfriamiento, etc.

Este modelo utiliza tres coeficientes empíricos, los cuales están basados en la experiencia industrial y no en un análisis estadístico que involucre las variables del proceso. Otra desventaja es que las unidades de desgaste obtenidas en la aplicación del modelo no corresponden a una variable conocida como lo es el volumen, peso o longitud.

La ecuación (5.40) muestra otro modelo que llama la atención por tener una base científica desarrollada en el criterio de Archard [9], sin embargo este modelo solo considera el área de contacto del rodillo de trabajo con la lámina y desprecia el área de contacto de los rodillos de apoyo y trabajo, además de que al sustituir las unidades de las variables estudiadas el resultado obtenido para la profundidad de desgaste no es una variable de longitud, este modelo matemático es el que se describe a continuación:

$$W_w = K_{wr} \left[\frac{F_w}{W l_d} \right]^n \frac{L_g l_d}{D_{wr}} \quad (5.40)$$

En donde:

W_w = Profundidad de desgaste

K_{wr} = Coeficiente de desgaste (mm^3/KNKm)

W = Ancho de la lamina (mm)

l_d = Longitud de contacto (mm)

F_w = Fuerza de laminado (KN)

L_g = Longitud total de laminado (m)

D_{wr} = Diámetro del rodillo de trabajo (mm)

$n = 0.3$

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Francisco Martínez Pérez, La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento, Limusa, Noriega Editores, México, D.F, 1996.

- [2] ASM International Handbook Committee, ASM Handbook Volume 18, ASM International, Estados Unidos de America, 2004.

- [3] K.L Jhonson. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña, 1985.

- [4] T.A Stolarski, Tribology in Machine Design, Heinemann Newnes, Oxford, Gran Bretaña, 1990.

- [5] J.F. Archard, Lecture Notes, University of Leicester, Departamento de Ingeniería, Febrero 1978.

- [6] S. Timoshenko and J.N Goodier, Theory of Elasticity, 2nd Edn. Mc Graw Hill and Kogakusha. Nueva York, Estados Unidos de America, 1951.

- [7] R.D. Arnell, P.B Davies, J. Halling, T.L Whomes, Tribology, Principles and Design Applications, The Macmillan Press Ltd., Springer – Verlag Nueva York, Estados Unidos de America, 1993.

- [8] Vladimir B. Ginzburg, High – Quality Steel Rolling, Theory and practice, Marcel Dekker Inc., Nueva York, Estados Unidos de America, 1993.

- [9] Jorge Ramírez C., Julio Morales, Ignacio Sandoval C., Miguel Cantu R., José Olvera B. Desgaste en rodillos de trabajo ICDP, HSS, HiCr en el cuarto castillo en un laminador tipo compacto y uno convencional de productos planos, Documento Interno, San Nicolás de los Garza N.L, México, 2003.

- [10] Bowden F P y Tabor D, The friction and lubrication of solids, Part 1, Oxford University Press, Oxford, Estados Unidos de America, 1964.

CAPITULO 6

DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO.

6.1 SELECCIÓN DE VARIABLES.

La mayoría de los modelos de desgaste existentes utilizan una serie de variables analizadas y coeficientes empíricos que se han desarrollado a lo largo de la experiencia, para este análisis se contempla analizar las siguientes variables:

Número de pases de laminación

Número de castillo de laminación

Cargas de laminación

Ancho de la lámina

Espesores o calibres de la lámina

Longitud total de la lámina

Arco de contacto

Diámetro del rodillo de trabajo

Diámetro del rodillo de apoyo

Propiedades mecánicas del rodillo de trabajo (módulo de elasticidad y dureza)

Propiedades mecánicas del rodillo de apoyo (módulo de elasticidad y dureza)

Coeficientes de desgaste

Metalografías de rodillos de trabajo

Rugosidad de rodillos de trabajo

Temperatura de rodillos de trabajo

Material laminado

Áreas de contacto

La dureza, metalografía, rugosidad y temperatura de los rodillos de laminación son las variables que se toman por levantamiento directamente en el área de trabajo, el resto de las variables consiste en una toma de datos en planta, específicamente en los molinos de laminación, control de procesos, control de calidad y taller de rectificadores. El método utilizado para graficar los datos estadísticos es el de regresión de mínimos cuadrados.

6.2 DESARROLLO DEL MODELO.

En la teoría de contacto elástico que se analizó en el Capítulo 5, se establecieron las ecuaciones de Hertz para superficies no conformantes debido a la presión de contacto entre ellas, estas ecuaciones son[1]:

$$a = (3PR/4E^*)^{1/3} \quad (6.1)$$

$$\delta = a^2/R = (9P^2/16RE^{*2})^{1/3} \quad (6.2)$$

$$p_o = 3P/2\pi a^2 = (6PE^{*2}/\pi^3 R^2)^{1/3} \quad (6.3)$$

En donde:

a = Radio del área de contacto

P = Carga normal

R = Radio relativo de curvatura

E^* = Módulo elástico efectivo

δ = Acercamiento mutuo entre las dos superficies

p_o = Presión máxima

El radio relativo de curvatura R está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6.4)$$

En donde R_1 y R_2 representan los radios de cada una de las esferas o cilindros que están en contacto como se muestra en la Figura 6.1a.

Para el caso del proceso de laminación en donde una de las superficies es completamente plana o tiende a infinito, se considera que solamente existe el radio del rodillo de trabajo R_1 y el radio de la otra superficie de contacto R_2 se considera que tiende a infinito, como se muestra en la Figura 6.1b.

Por lo tanto la ecuación 6.4 queda de la siguiente forma:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \quad (6.5)$$

El módulo de elasticidad efectivo E^* está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6.6)$$

Para el caso del proceso de laminación en caliente la lámina se encuentra a temperaturas superiores a los 900°C , por lo tanto se puede considerar que el valor del módulo de elasticidad del acero E_2 se reduce en mas de un 30%, de tal manera que se puede despreciar este valor en la ecuación (6.6) y nos queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \quad (6.7)$$

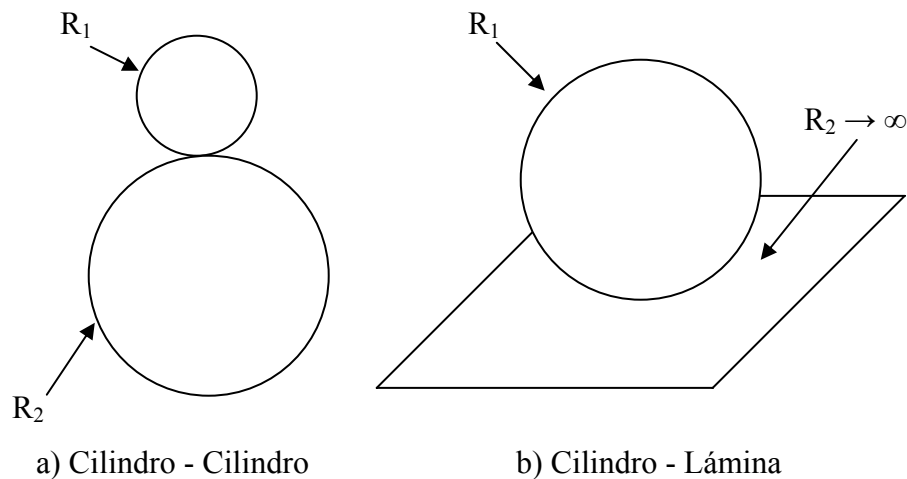


Figura 6.1.- Superficies de contacto.

En la ecuación de desgaste abrasivo (5.38) que se analizó en el Capítulo 5, se estableció la siguiente formula:

$$V = \frac{K_{abr} Lx}{H} \quad (6.8)$$

En donde:

V = Volumen del material removido

K_{abr} = Coeficiente de desgaste abrasivo

L = Carga aplicada

x = Distancia recorrida

H = Dureza del material más suave

Si se aplica la ecuación (6.8) en el proceso de laminación se considera que el volumen de material removido en el rodillo es el material que se desgasta y equivale al área de contacto real por la altura desgastada Ah , aplicando este principio y considerando que para el caso de contacto plástico del rodillo con la lamina la dureza no tiene influencia alguna, la ecuación (6.8) queda de la siguiente manera:

$$Ah = K_{abr1} Lx \quad (6.9)$$

Despejando la altura del materia desgastado h y considerando que $\frac{L}{A}$ representa la presión de una carga sobre una área determinada se puede sustituir en la ecuación (6.9), P_0 , considerando que se está buscando la presión máxima de contacto, de tal modo que la ecuación (6.9) queda de la siguiente manera [2]:

$$h = K_{abr1} P_0 x \quad (6.10)$$

Sustituyendo la ecuación (6.3) en la ecuación (6.10), queda de la siguiente manera:

$$h = K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x = K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 \pi R^2} \right]^{\frac{1}{3}} x \quad (6.11)$$

La Figura 6.2 ilustra el principio básico de laminación, donde se puede apreciar que el área de contacto $A = Wl$. Aplicando la teoría de contacto en la que el área establece un radio relativo de curvatura R , en la cual el área de contacto es $A = \pi R^2$, se puede sustituir en la ecuación (6.11) por el área de contacto establecido anteriormente para el proceso de laminación, quedándonos la siguiente ecuación:

$$h = K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 Wl} \right]^{\frac{1}{3}} x \quad (6.12)$$

En donde:

W = Ancho de la cinta

l = Arco de contacto

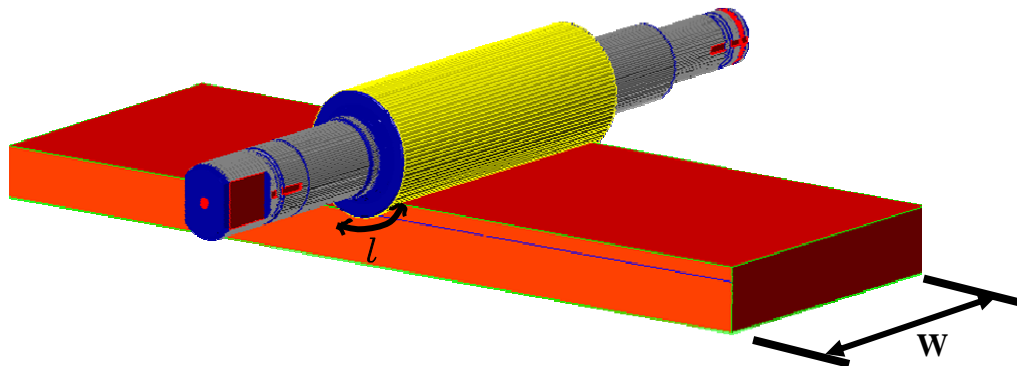


Figura 6. 2.- Principio básico de laminación que ilustra el área de contacto.

El proceso de laminación es un proceso en el que el material de mayor dureza se encuentra girando y la ecuación básica de desgaste fue generada a partir de un modelo en el que el material duro se mueve en línea recta sin girar, por tal motivo para el desarrollo del modelo se debe de multiplicar la ecuación (6.12) por un factor que relaciona el arco de contacto con el perímetro del material duro $\frac{l}{\pi D}$ (para el caso de contacto entre dos cilindros este será $\frac{D_1}{D_2}$), que es el área que se encuentra siempre en contacto con la lámina que deforma, de tal manera que la ecuación (6.12) quedaría de la siguiente manera:

$$h = K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 Wl} \right]^{\frac{1}{3}} x \frac{l}{\pi D} \quad (6.13)$$

Con la ecuación (6.13) se puede calcular el valor unitario de la altura que se desgasta el rodillo de laminación para cada planchón que es procesado, sin embargo una campaña de laminación consta de varios planchones laminados, variando de acuerdo con la programación de la producción, por tal motivo el valor total del desgaste por campaña de laminación corresponde a una sumatoria de valores acumulándose los desgaste desde el primer planchón hasta el número de planchón indefinido n .

$$h = \sum_1^n K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 Wl} \right]^{\frac{1}{3}} x \frac{l}{\pi D} \quad (6.14)$$

La Figura 6.3 representa el principio básico de laminación, en donde se puede observar que existen dos áreas de contacto que producen desgaste sobre el rodillo de trabajo que está en contacto directo con el planchón que se está laminando y es soportado por otro rodillo de apoyo, para este caso se deben de sumar los dos desgastes producidos. Considerando que la longitud total de la lámina identificada como L es equivalente a la distancia recorrida x , y aplicando en el área de contacto de los dos rodillos los mismos

criterios que se utilizaron para desarrollar la ecuación en el área de contacto del planchón con los rodillos, la ecuación final del modelo matemático quedaría de la siguiente forma:

$$h = \sum_1^n K_{abr1} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^2 Wl} \right]^{\frac{1}{3}} L \frac{l}{\pi D_1} + \sum_1^n K_{abr2} \left[\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} L \frac{D_1}{D_2} \quad (6.15)$$

En donde:

n = Número de planchones laminados

D_1 = Diámetro del rodillo de trabajo

D_2 = Diámetro del rodillo de apoyo

L = Longitud total de la lámina

K_{abr2} = Coeficiente de desgaste abrasivo

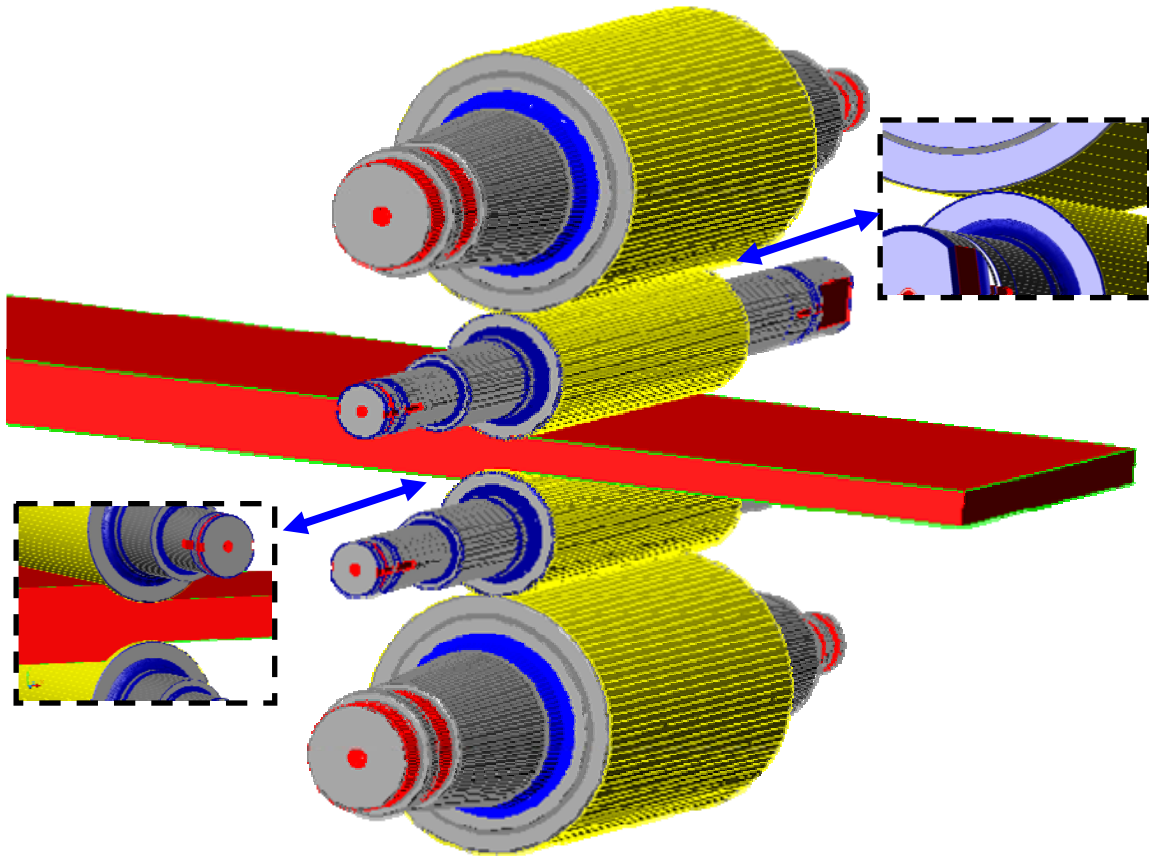


Figura 6.3 .- Principio básico de laminación que ilustra las dos áreas de desgaste.

6.3 CALCULO DE COEFICIENTES DE DESGASTE.

En la Figura 6.4, se representa una de las gráficas que se obtienen del programa de una máquina rectificadora de superficies cilíndricas, que se utiliza para rectificar los rodillos después de cada campaña de laminación, en esta figura se puede ver el perfil ideal y real del rodillo antes de que éste entre a laminar y después de que ha laminado.

Esta gráfica es de suma importancia ya que con el modelo generado en este estudio se puede predecir el desgaste promedio que se representa en la figura, el cual se obtiene por medio de un sensor de tacto que toca la superficie del rodillo y registra los datos en un microprocesador que decodifica la información y la representa gráficamente.

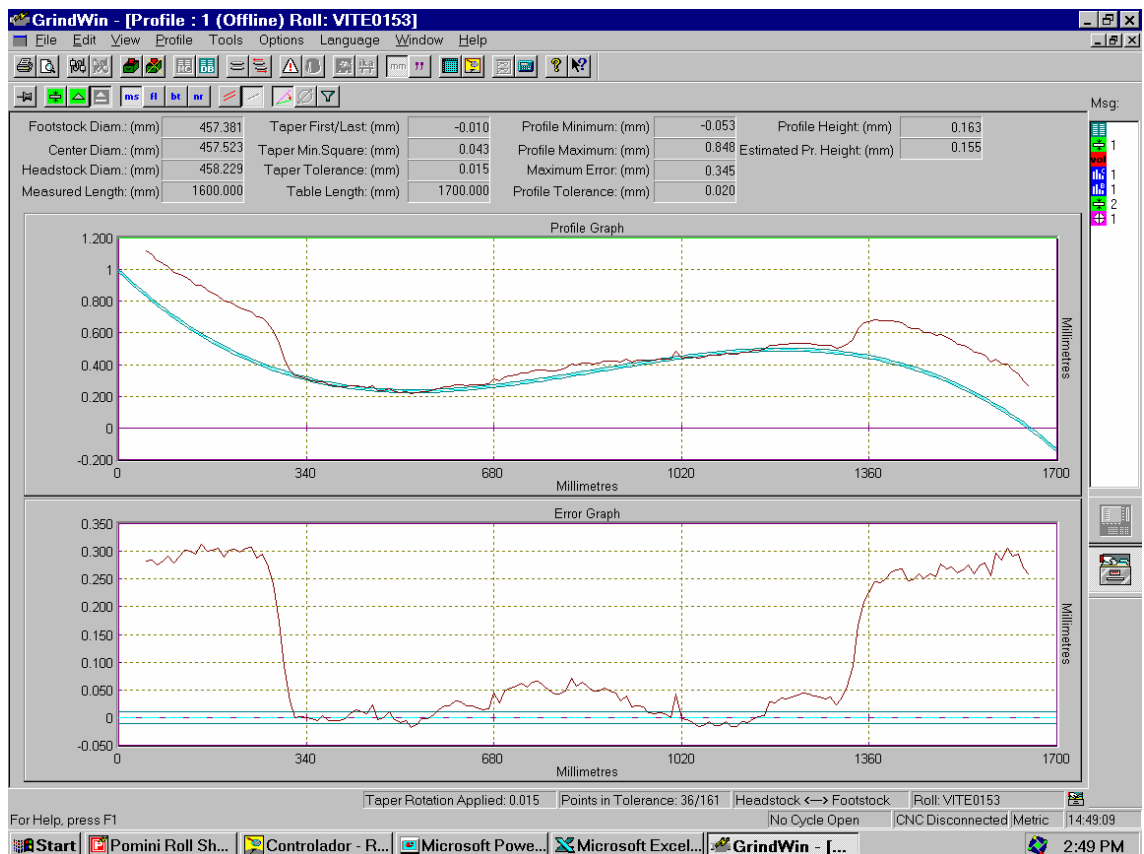


Figura 6.4.- Gráfica de perfil ideal y real, para un rodillo de laminación.
— Ideal, — Real

En el Anexo I se muestran las gráficas de desgaste que se obtuvieron, estas gráficas se comparan con los valores obtenidos en el modelo del molino, los cuales tienen un margen de error de 5%, sin embargo por carecer de otra información estos datos son los que se utilizan para calcular el coeficiente de desgaste, el cual es una de las variables más importantes para aplicar al modelo matemático.

Para predecir el desgaste que sufre un rodillo de laminación de trabajo se requieren de dos coeficientes de desgaste, como se muestra en la Figura 6.3, las áreas de contacto del rodillo de trabajo con el sistema son dos, en las cuales las variables de contacto son completamente diferentes, por tal motivo se deben de realizar cálculos para cada área en particular.

Las variables del coeficiente de desgaste son: volumen / fuerza x distancia (sus unidades son: mm^3 / kNm), para el cual el volumen se considera como el material que pierde el rodillo en cada campaña de laminación, la fuerza es la carga de laminación y la distancia es la longitud de la lamina procesada. Como se puede ver estas variables son fluctuantes para cada caso en particular, haciendo que este proceso sea considerado altamente dinámico.

El volumen de material desgastado en el proceso de laminación corresponde al desgaste que sufre el rodillo de trabajo en el largo de la tabla, por lo cual para calcularlo se utiliza el ancho de contacto que existe entre los dos rodillos, el desgaste promedio que se obtiene en las graficas de rectificado (comparado con los datos de los diseñadores de molinos) y el perímetro del rodillo de trabajo, como se va a utilizar el cálculo del perímetro se requiere de los diámetros de los rodillos de trabajo y apoyo.

6.3.1 Coeficiente de desgaste generado entre el rodillo de trabajo y la lámina (K_{abr1}).

El primer caso a analizar es el contacto que sufre el rodillo de trabajo con la lámina que se está deformando, en la Figura 6.3 se puede observar que el contacto mecánico de ambos cuerpos obedece a la teoría de Hertz de contacto elástico [1], sin embargo para determinar el coeficiente de desgaste se requiere de un análisis de las variables tomadas en campo y posteriormente del cálculo para determinar el valor promedio que se va a utilizar en cada uno de los casos en el proceso de laminación.

En el Anexo II, se encuentran las Tablas IIa, IIb y IIc, las cuales contienen los datos tomados en planta para los Castillos 4, 5 y 6 respectivamente, así como los datos calculados que servirán de análisis para determinar el coeficiente de desgaste estudiado en este apartado. La Figura 6.5, muestra la relación del volumen en función de la fuerza de laminación y la longitud laminada, así como sus respectivas tendencias para los datos obtenidos en los castillos 4, 5 y 6. Los valores de volumen, fuerza y longitud fueron calculados utilizando las variables que se tomaron en campo y que se encuentran en las tablas del Anexo II.

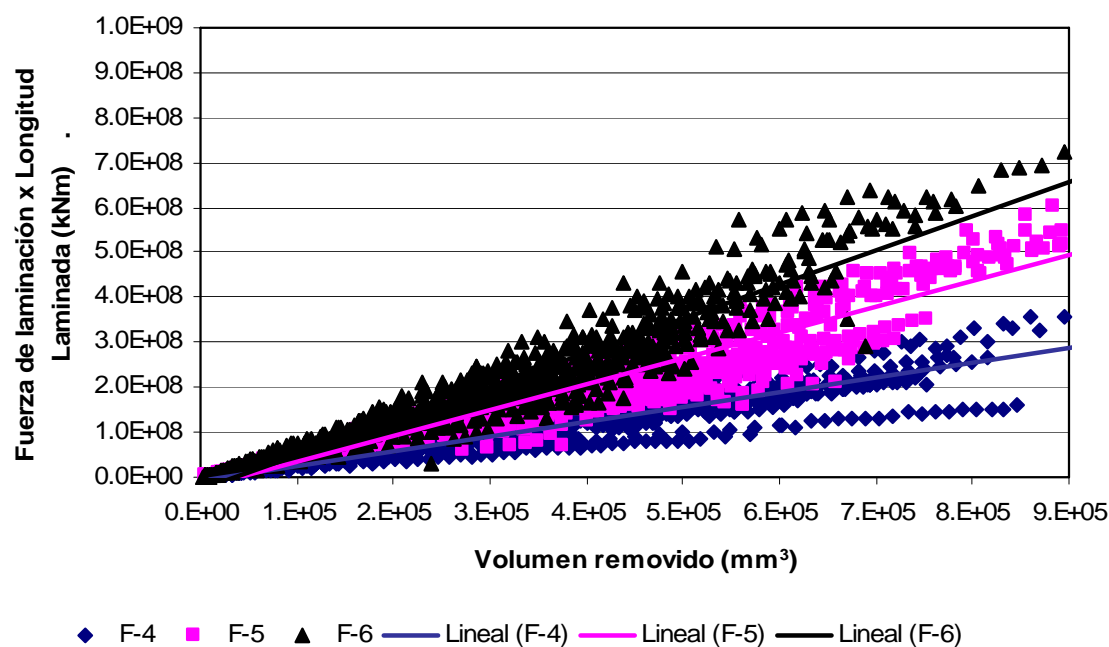


Figura 6.5.- Relación de volumen en función de la fuerza de laminación y longitud laminada para los Castillos 4, 5 y 6.

En una de las columnas de las tablas que forman el Anexo II se encuentra el cálculo del coeficiente de desgaste para cada campaña de laminación, al final de la misma columna se establece el coeficiente promedio que deberá de aplicarse para cada castillo en particular. Estos valores son los que se muestran a continuación en la Tabla 6.1:

Castillo	K_{abr1} (mm ³ /KNm)		
	Superior	Inferior	Promedio
F-4	0.00345016	0.00361349	0.00353182
F-5	0.00215861	0.00227892	0.00221877
F-6	0.00168821	0.00179284	0.00174053

Tabla 6.1.- Coeficiente de desgaste promedio para el contacto del rodillo de trabajo y la lámina.

El valor del coeficiente de desgaste puede ser representado también de manera gráfica, comparándose por castillo y por la posición que ocupan en el molino de laminación, la Figura 6.6 muestra estos valores, donde se puede apreciar que no existe una variación significativa del promedio con respecto a las posiciones, pero sí una variación en cuanto al castillo en donde se está analizando.

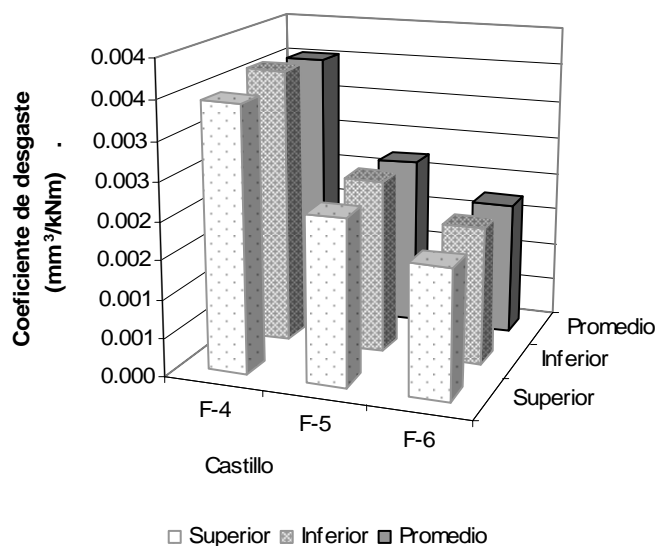


Figura 6.6.- Representación gráfica del coeficiente de desgaste que se genera al contacto de la lámina con el rodillo de trabajo.

El valor promedio del coeficiente de desgaste es la variable que se aplica en el modelo matemático desarrollado, sin embargo es de interés analizar el comportamiento que tiene esta variable en cada campaña de laminación.

El largo de la cinta o longitud de la lámina y la fuerza de laminación son las principales variables que se utilizan para el cálculo del coeficiente de desgaste, por tal motivo resulta interesante graficar el coeficiente en función de cada una de estas variables. En las Figuras 6.7a y 6.7b, se muestra el comportamiento que cada una de estas variables tiene en relación con el coeficiente calculado. Para ambos casos la pendiente de la tendencia presenta el mismo sentido, sin embargo es mayor para el caso del análisis del coeficiente en función de la fuerza de laminación. Para el análisis del coeficiente en función de la longitud laminada la pendiente de la tendencia es ligeramente menor, sin embargo manifiesta la misma tendencia de incrementarse el coeficiente conforme disminuye el largo de la cinta o longitud laminada.

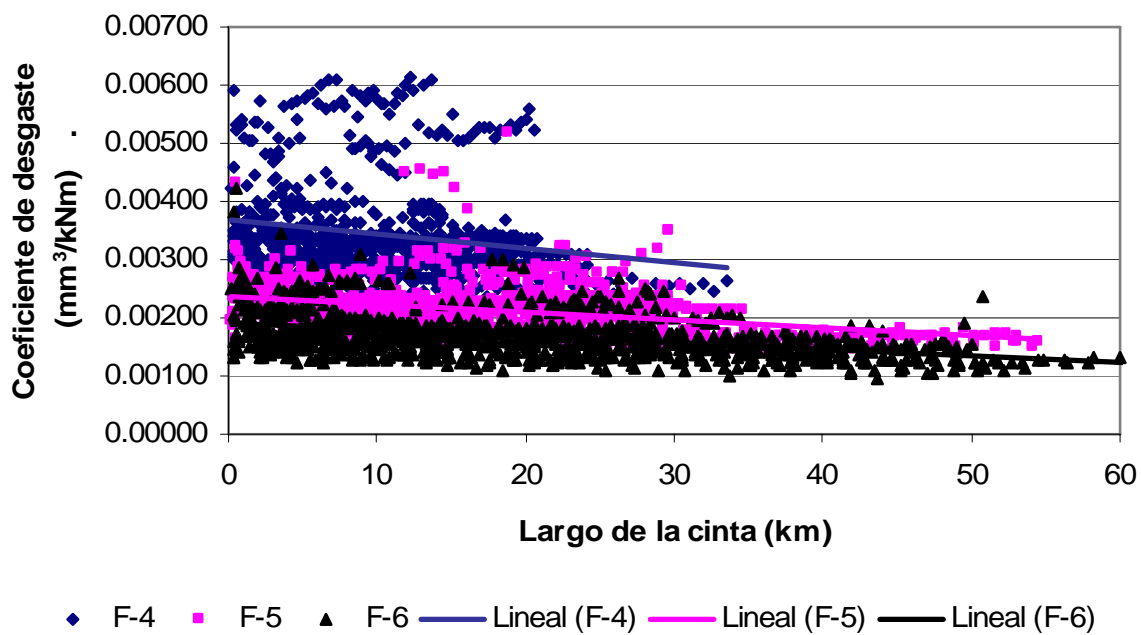


Figura 6.7 a.- Relación del coeficiente de desgaste en función del largo de cinta (longitud laminada).

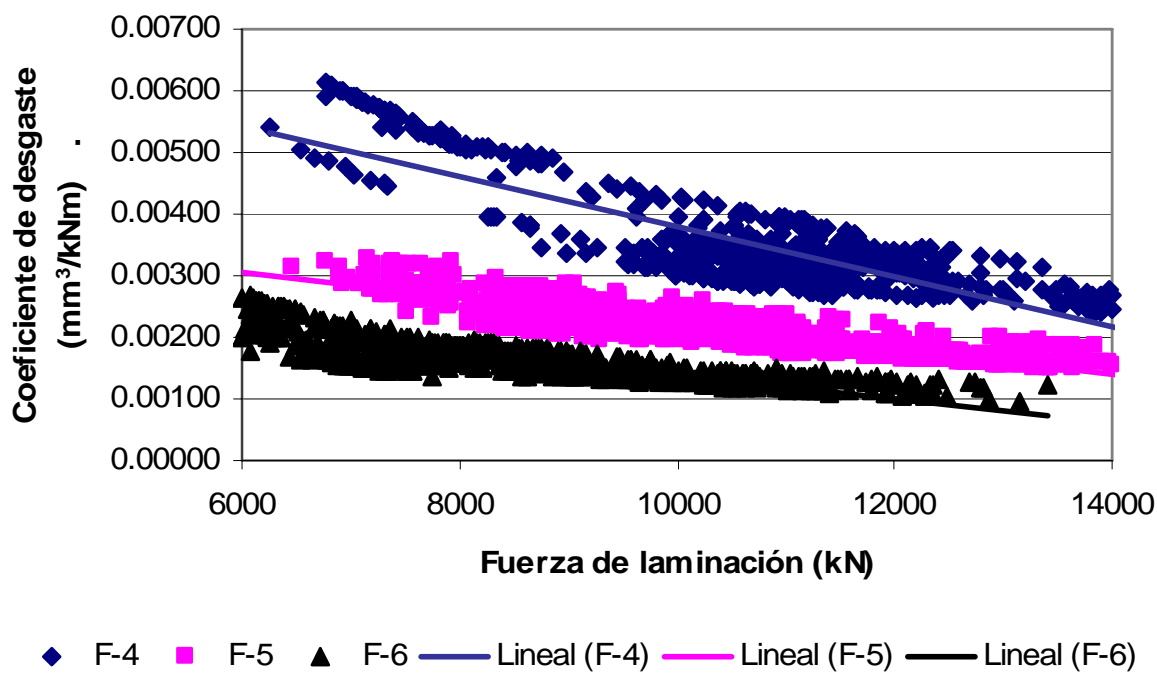


Figura 6.7 b.- Relación del coeficiente de desgaste en función de la fuerza de laminación.

Las variables del coeficiente de desgaste (volumen, fuerza y distancia) son valores preestablecidos en el modelo de laminación para cada castillo en particular y tienen efecto con relación al desgaste, sin embargo el valor del coeficiente de desgaste varía en función del desgaste mismo, como se puede ver en la Figura 6.8 la tendencia del coeficiente es la misma para todos los castillos, el valor del coeficiente se incrementa si el desgaste obtenido disminuye. La aplicación de este coeficiente en el modelo matemático desarrollado consiste de una constante, por lo cual se debe de determinar un promedio de esta variable por métodos estadísticos, la cual ya se definió anteriormente en la Tabla 6.1.

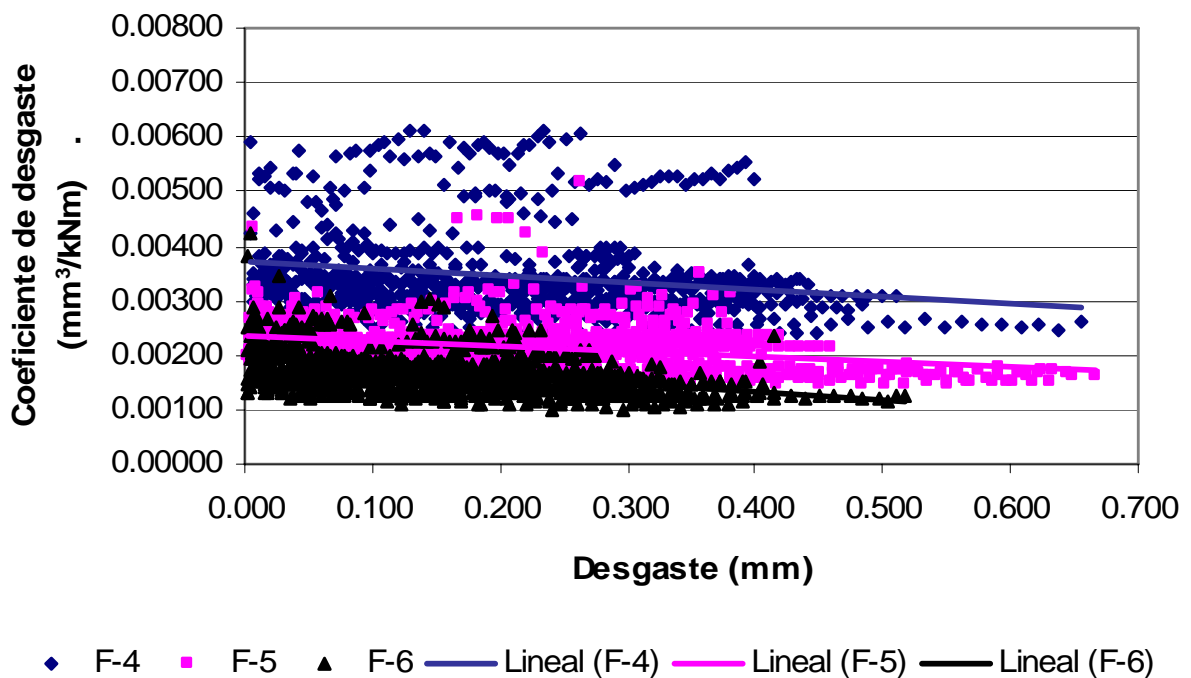


Figura 6.8.- Relación del coeficiente de desgaste en función del desgaste.

6.3.2 Coeficiente de desgaste generado entre rodillos de laminación (K_{abr2}).

El segundo caso a analizar es el contacto que sufre el rodillo de trabajo con el rodillo de apoyo. En la Figura 6.3 se puede observar que el contacto mecánico de ambos cuerpos obedece a la teoría de Hertz de contacto elástico [1], sin embargo para determinar el coeficiente de desgaste se requiere de un análisis de las variables tomadas en campo y posteriormente del cálculo para determinar el valor promedio que se va a utilizar en cada uno de los casos en el proceso de laminación.

En el Anexo III, se encuentran las Tablas IIIa, IIIb y IIIc, las cuales contienen los datos tomados en planta para los Castillos 4, 5 y 6 respectivamente, así como los datos calculados que servirán de análisis para determinar el coeficiente de desgaste estudiado en este apartado. La Figura 6.9, muestra la relación del volumen en función de la fuerza de laminación y la longitud laminada, así como sus respectivas tendencias para los datos obtenidos en los castillos 4, 5 y 6. Los valores de volumen removido, fuerza y longitud fueron calculados utilizando las variables que se tomaron en campo y que se encuentran en las tablas del Anexo III.

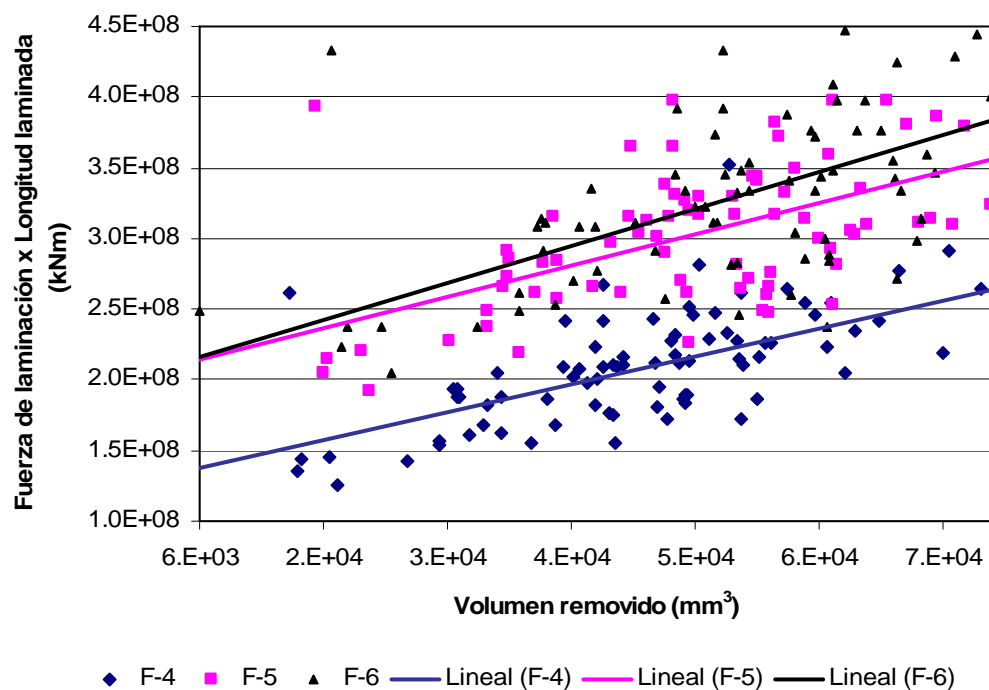


Figura 6.9.- Relación de volumen en función de la fuerza de laminación y la longitud laminada para los Castillos 4, 5 y 6.

En una de las columnas de las tablas que forman el Anexo III se encuentra el cálculo del coeficiente de desgaste para cada campaña de laminación, al final de la misma columna se establece el coeficiente promedio que deberá de aplicarse para cada castillo en particular. Estos valores son los que se muestran a continuación en la Tabla 6.2.

Castillo	$K_{abr2} (mm^3/kNm)$		
	Superior	Inferior	Promedio
F-4	0.00016755	0.00018269	0.00017512
F-5	0.00015044	0.00014293	0.00014668
F-6	0.00014683	0.00014170	0.00014427

Tabla 6.2.- Coeficiente de desgaste promedio para el contacto de los dos rodillos.

El valor del coeficiente de desgaste puede ser representado también de manera gráfica, comparándose por castillo y por la posición que ocupan en el molino de laminación, la Figura 6.10 nos muestra estos valores, donde se puede apreciar que no existe una variación significativa del promedio con respecto a las posiciones, pero si una variación en cuanto al castillo en donde se está analizando.

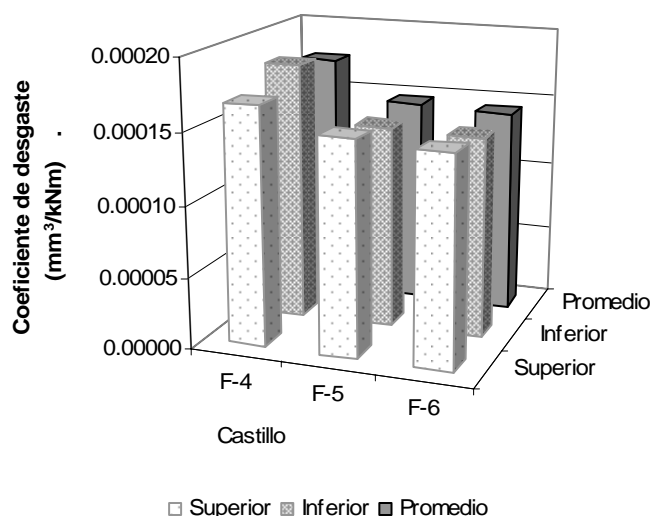


Figura 6.10.- Representación grafica del coeficiente de desgaste que se genera al contacto mecánico de los dos rodillos.

El valor promedio del coeficiente de desgaste es la variable que se aplica en el modelo matemático desarrollado, sin embargo es de interés analizar el comportamiento que tiene esta variable en cada campaña de laminación.

El largo de la cinta o longitud lámina y la fuerza de laminación son las principales variables que se utilizan para el cálculo del coeficiente de desgaste, por tal motivo resulta interesante graficar el coeficiente en función de cada una de estas variables. En las Figuras 6.11a y 6.11b, se muestra el comportamiento que cada una de estas variables tiene en relación con el coeficiente calculado. Para este caso resulta interesante un análisis del por que la pendiente de la tendencia para ambos casos es diferente en magnitud y sentido, para el caso de la Figura 6.11a, el coeficiente de desgaste se incrementa conforme aumenta el largo de la cinta laminada y para el caso de la Figura 6.11b, se puede observar que el coeficiente de desgaste disminuye conforme se incrementa la carga de laminación, no existe una relación lógica, sin embargo los datos de campo analizados así lo determinan.

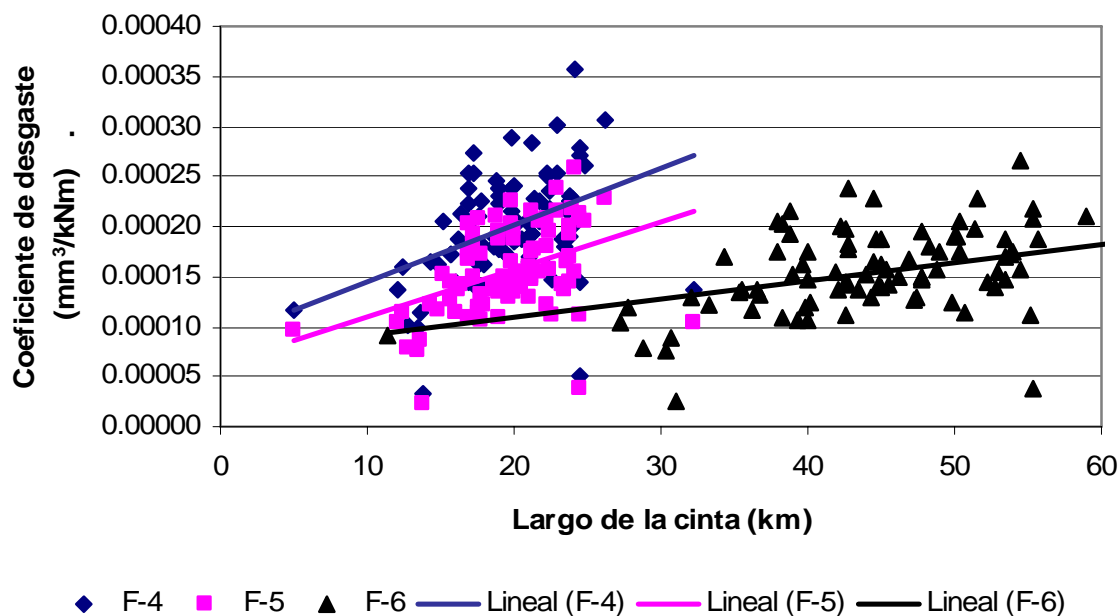


Figura 6.11 a.- Relación del coeficiente de desgaste en función del largo de cinta (longitud laminada).

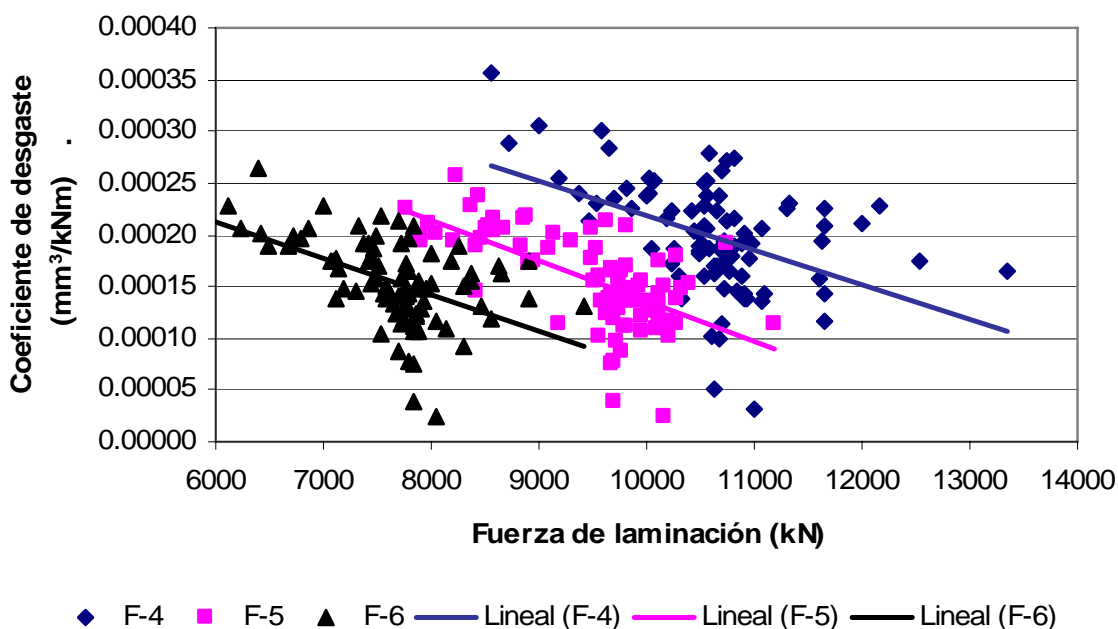


Figura 6.11 b.- Relación del coeficiente de desgaste en función de la fuerza de laminación.

Las variables del coeficiente de desgaste (volumen, fuerza y distancia) son valores preestablecidos en el modelo de laminación para cada castillo en particular y tienen efecto con relación al desgaste, sin embargo el valor del coeficiente de desgaste varía en función del desgaste mismo, como se puede ver en la Figura 6.12 la tendencia del coeficiente es la misma para todos los castillos, el valor del coeficiente se incrementa si el desgaste obtenido se incrementa también. La aplicación de este coeficiente en el modelo matemático desarrollado consiste de una constante, por lo cual se debe de determinar un promedio de esta variable por métodos estadísticos, la cual ya se definió anteriormente en la Tabla 6.2.

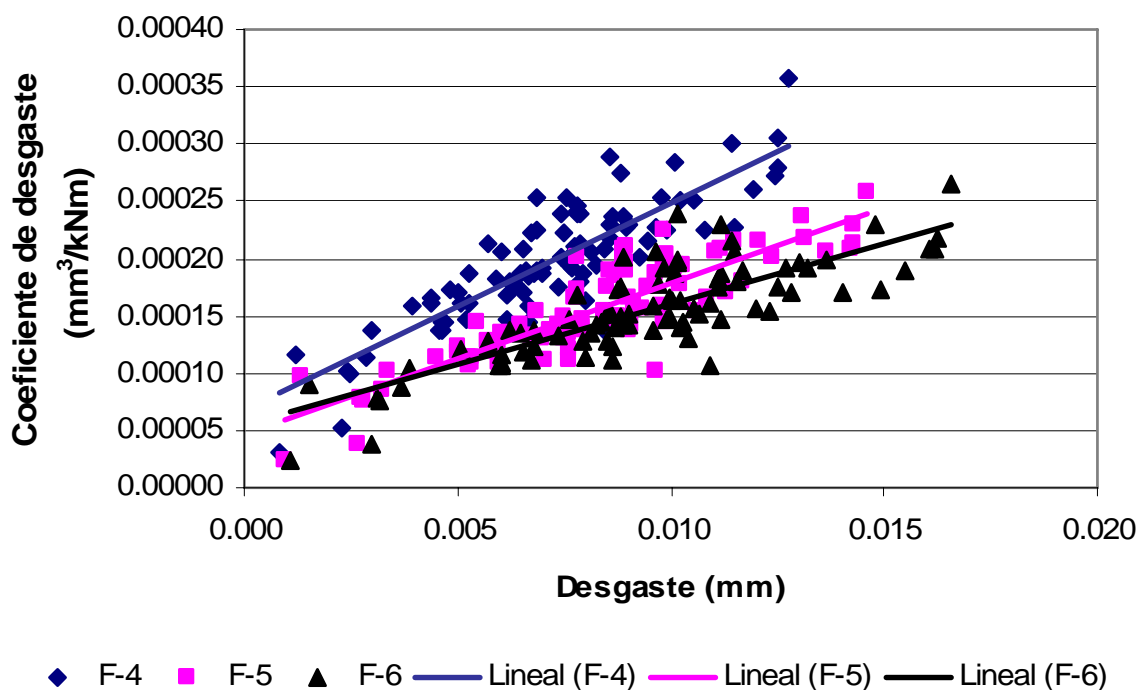


Figura 6.12.- Relación del coeficiente de desgaste en función del desgaste.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

[1] K.L Jhonson. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña, 1985.

[2] R.D. Arnell, P.B Davies, J. Halling, T.L Whomes, Tribology, Principles and Design Applications, The Macmillan Press Ltd., Springer – Verlag Nueva York, Estados Unidos de America, 1993.

[3] J.F Archard, Lecture Notes, University of Leicester, Departamento de ingeniería, Febrero 1978.

CAPITULO 7

ANALISIS DE RESULTADOS.

7.1 INTRODUCCION.

Dado que el fin que se persigue con este trabajo es desarrollar y validar un modelo que permita predecir el desgaste que van a tener los rodillos en cada campaña de laminación, es necesario realizar el levantamiento de datos y análisis de resultados en dos partes, la primera consiste en un levantamiento de campo acompañado de diferentes ensayos mecánicos e inspecciones de laboratorio, en donde se le dará seguimiento a seis rodillos de laminación en dos molinos diferentes durante toda su vida útil y la segunda consiste en analizar los datos técnicos de los molinos de laminación, sus condiciones de operación así como las variables del proceso. Para la segunda parte de este proceso se presentan los datos obtenidos para una pareja de rodillos VITE-153 y VITE-154. Sin embargo, el seguimiento y análisis de variables se realizó durante un periodo de dos años de trabajo, comprobando que los resultados obtenidos son repetitivos para cada pareja de rodillos analizada. El método utilizado para graficar los datos estadísticos es el de regresión de mínimos cuadrados.

7.2 ANALISIS DE DATOS EN CAMPO.

Existen cuatro variables para los rodillos de laminación que están íntimamente relacionadas una con otra, estas variables son microestructura, dureza, rugosidad y la temperatura del rodillo después de cada campaña de laminación. El levantamiento de campo consiste en realizar ensayos de dureza Equotip LD para posteriormente comparar y analizar los cambios que sufre el material. La rugosidad y la temperatura son medidos con los equipos correspondientes para cada caso, después de cada campaña de laminación. Para la inspección metalográfica se toma una replica de campo y posteriormente se analiza en el laboratorio, esta inspección se repite en 3 etapas de la vida útil del rodillo de laminación. Los datos generales de los rodillos analizados se muestran en la Tabla 7.1 y el análisis químico en la Tabla 7.2.

No.rodillo	Calidad (*)NiHr	No. campañas			Producción (Toneladas)	Diámetro Inicial	Diámetro Final	Material Rectificado	Rendimiento Ton/mm
		F-4	F-5	F-6					
17350	C177S	14	26	19	51163.29	501.71 mm	450.25 mm	51.46 mm	994.23
17351	C177S	16	24	22	54567.98	501.85 mm	449.75 mm	52.1 mm	1047.37
17352	C177S	15	22	26	53879.98	501.92 mm	450.97 mm	50.95 mm	1057.50
21690	C182	18	23	35	133063.00	648.10 mm	596.59 mm	51.51 mm	2582.92
21691	C182	19	26	31	133005.00	648.00 mm	596.82 mm	51.18 mm	2598.76
21692	C182	17	14	42	122255.00	647.52 mm	597.00 mm	50.52 mm	2419.90

Tabla 7.1.- Resumen general de rodillos analizados.

Calidad NiHr	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Nb	W
C177S	3.30	0.75	0.95	0.05	0.01	1.70	4.40	0.45	0.75	0.75	0.75	0.75
C182	3.30	1.00	0.85	0.05	0.01	1.80	4.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.75

Tabla 7.2.- Análisis químico de los rodillos de laminación.

7.2.1 Dureza superficial analizada en campo.

La dureza del rodillo la determina directamente la aleación del material y su tratamiento térmico, por tal motivo la caída de dureza es mínima en el proceso de laminación en caliente. En el Anexo IV, se registran los datos obtenidos de dureza en relación con cada campaña de laminación y estos mismos datos se representan en la Figura 7.1. Como se puede observar en la gráfica, las curvas de dureza tienen el mismo perfil para todos los casos, se observa una pequeña diferencia para los rodillos números 17530, 17531 y 17532 con respecto al segundo grupo de rodillos analizados números 21690, 21691 y 21692, esto se debe a que el análisis químico para cada uno de los casos es ligeramente diferente, provocando ese pequeño cambio en la dureza de las aleaciones.

El primer grupo de rodillos que corresponde a un grado de material C177S, tiene un promedio de dureza máxima de 800° Equotip LD y la pérdida de dureza promedio es de 17.66° Equotip LD, que representa un 2.2% del total de dureza.

El segundo grupo de rodillos que corresponde a un grado de material C182, tiene un promedio de dureza máxima de 815° Equotip LD y la pérdida de dureza promedio es de 25° Equotip LD, que representa un 3.43% del total de dureza.

Para ambos casos la caída de dureza fluctúa en un 3%, el cual no tienen influencia considerable en el proceso de laminación en caliente, por lo cual se desprecia este factor en el análisis, pero si es conveniente tomarlo en cuenta para estudios posteriores [1-3].

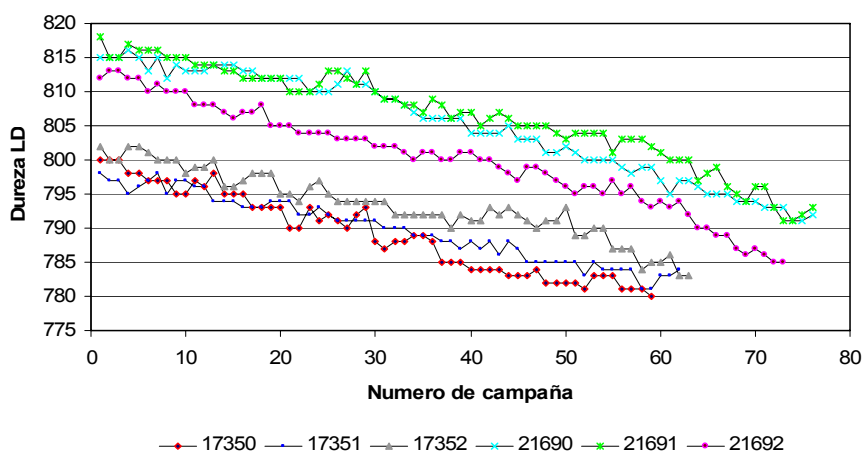


Figura 7.1.- Dureza superficial de rodillos después de cada campaña de laminación.

7.2.2 Réplicas metalográficas tomadas en campo y analizadas en laboratorio.

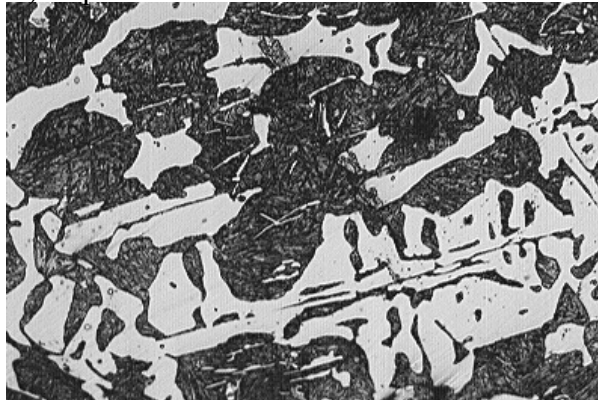
La metalografía del material indica los cambios en las propiedades mecánicas del material utilizado, en la Figura 7.2a, b y c, se representan las réplicas de micrografías tomadas a la pareja de rodillos analizada (VITE-153 y VITE-154), la Figura 7.2 a, muestra la metalografía que tiene el rodillo al inicio de su vida útil, cuando el rodillo tiene un diámetro de 500 mm. La Figura 7.2 b, muestra la metalografía que tiene el rodillo cuando éste ha trabajado la mitad de su vida útil, esto significa que la replica fue tomada cuando el rodillo llegó al diámetro de 475 mm y por último la Figura 7.2 c, muestra la metalografía del rodillo cuando éste llegó al final de su vida, esto es cuando el rodillo tiene diámetro de 450 mm.

Para los tres casos la microestructura corresponde a una matriz de martensita revenida, se puede apreciar que si existe una pequeña variación en cuanto a la cantidad y finura de la matriz, esto se debe principalmente al cambio de dureza que sufre el rodillo conforme disminuye su vida útil.

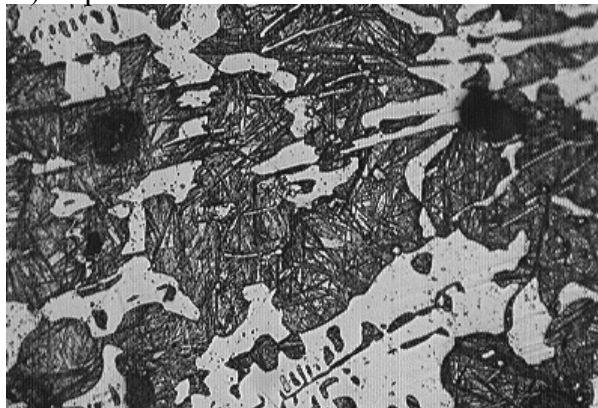
Se considera que esta variación no influye de manera significativa los resultados obtenidos de un análisis macroscópico de desgaste, sin embargo resultaría interesante realizar un análisis cuantitativo para determinar la relación del cambio de dureza con un cambio en la microestructura [3].



a) Replica tomada en 500 mm de diámetro.



b) Replica tomada en 475 mm de diámetro.



c) Replica tomada en 450 mm de diámetro.

Figura 7.2.- Matriz martensita revenida, atacado químicamente con nital 5%.

7.2.3 Rugosidad superficial del perfil.

La rugosidad del rodillo es un factor que no se considera relevante para el proceso de laminación en caliente debido a que el uso de acero laminado en caliente representa un 40% de la producción mundial de acero y éste no requiere de acabados en donde la rugosidad sea relevante, además de que los calibres que se manejan son relativamente mayores comparados con los materiales laminados en frío; sin embargo resulta interesante inspeccionar la rugosidad de los rodillos para tener una idea de cómo se comporta el desgaste que estos sufren. Las unidades utilizadas para medir esta variable son la rugosidad media R_a , también conocida como media aritmética, la cual es la desviación media de los valores absolutos de las alturas de las desviaciones del perfil medio, tomadas dentro de la longitud de la muestra.

Para la inspección de esta variable se programó una campaña de laminación de manera especial, en donde se realizaron 5 paros intermedios y se tomó la lectura en tres puntos específicos a lo largo de la tabla de los rodillos, estos puntos fueron seleccionados en base a la experiencia empírica observada en el proceso de laminación y corresponden a los extremos de la cinta laminada y el centro de la misma. El juego de rodillos inspeccionados en la campaña de laminación está formado como se describe en la Tabla 7.3.

Número de rodillo	Castillo	Posición
21734	4	Superior
21735	4	Inferior
21711	5	Superior
21712	5	Inferior
21723	6	Superior
21724	6	Inferior

Tabla 7.3.- Juego de rodillos de trabajo analizados.

Los datos obtenidos en esta inspección se encuentran en la Tabla 7.4 y se muestran en las Figuras 7.3 a-f.

Las Figuras 7.3 a y b, representan los valores de la rugosidad promedio obtenida para los rodillos superior e inferior que trabajaron en el castillo número cuatro, las Figuras 7.3 c y d, corresponden a las rugosidades promedio de los rodillos superior e inferior del castillo número cinco y por último las Figuras 7.3 e y f, corresponden a la rugosidad promedio obtenida para los rodillos superior e inferior del castillo seis.

Como se puede apreciar en todos los casos la rugosidad promedio de los rodillos superiores es menor comparada con la rugosidad promedio de los rodillos inferiores (normalmente existe una variación entre 2% y 5%), esto se debe principalmente a la distribución de cargas mecánicas y temperatura, además de que en el rodillo inferior caen algunas partículas de óxido y polvo metálico, que hacen que la superficie del rodillo se marque atenuando un poco más la rugosidad del rodillo.

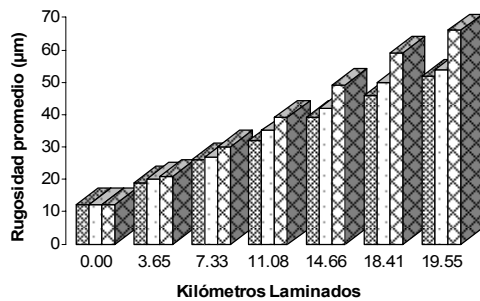
Comparando los resultados obtenidos, en el castillo cuatro se puede apreciar que los valores de la rugosidad promedio son mayores en el extremo motriz y va disminuyendo conforme se acerca al extremo operación; en el castillo número cinco se sigue conservando este principio, sin embargo se puede apreciar que el valor de la rugosidad promedio en el centro del rodillo tiende a disminuir o está muy cercano al valor que se obtienen en el extremo operación, y por último en el castillo seis se conserva el mismo patrón que indica que la rugosidad promedio es mayor en el extremo operación, sin embargo el valor de la rugosidad disminuye de manera considerable en el centro del rodillo, llegando a obtener valores por abajo del que se presenta en el extremo operación.

Rugosidad Promedio Castillo F-4 (μm)						
Kilómetros Laminados	Superior			Inferior		
	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz
0.00	12	12	12	12	12	12
3.65	19	20	21	20	19	20
7.33	26	27	30	27	26	29
11.08	32	35	39	36	36	38
14.66	39	42	49	43	44	50
18.41	46	50	59	50	51	60
19.55	52	54	66	55	56	67

Rugosidad Promedio Castillo F-5 (μm)						
Kilómetros Laminados	Superior			Inferior		
	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz
0.00	12	12	12	12	12	12
5.37	17	18	20	18	17	19
10.65	23	24	27	24	24	28
16.02	30	31	36	33	33	37
21.59	36	38	44	42	41	46
27.30	43	45	52	48	49	55
29.57	48	49	58	50	51	62

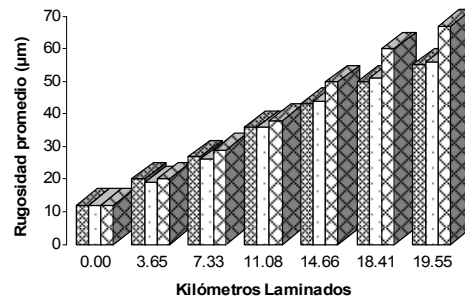
Rugosidad Promedio Castillo F-6 (μm)						
Kilómetros Laminados	Superior			Inferior		
	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz	Extremo Operación	Centro	Extremo Motriz
0.00	12	12	12	12	12	12
6.71	17	16	21	17	17	19
13.24	22	21	28	23	22	28
19.93	28	26	37	30	28	37
26.98	34	32	45	36	34	46
34.12	41	38	52	44	41	55
36.96	45	42	55	48	45	60

Tabla 7.4.- Resultados obtenidos en el análisis de rugosidad promedio (Ra).



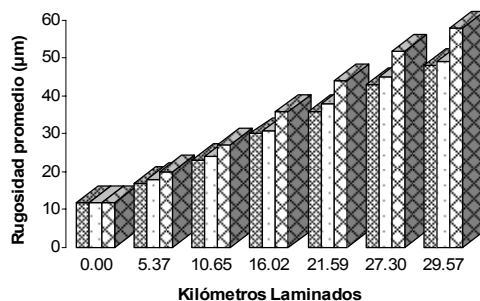
■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

a) Castillo F-4, posición Superior



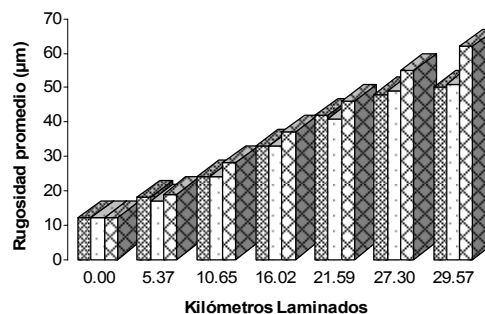
■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

b) Castillo F-4, posición Inferior



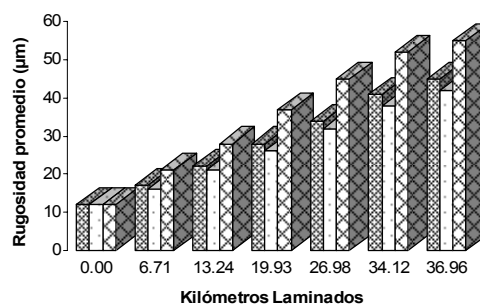
■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

c) Castillo F-5, posición Superior



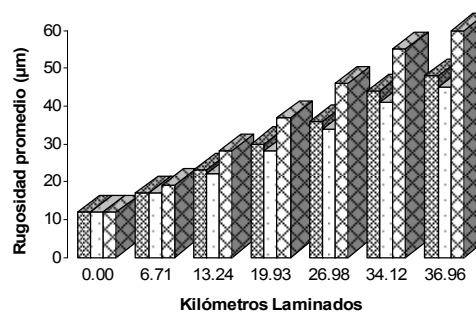
■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

d) Castillo F-5, posición Inferior



■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

e) Castillo F-6, posición Superior



■ Extremo Operación □ Centro ■ Extremo Motriz

f) Castillo F-6, posición Inferior

Figura 7.3.- Representación grafica de los datos obtenidos en el análisis de rugosidad promedio (Ra).

Con los datos mostrados en la Tabla 7.4 y representados en la Figura 7.3, se tiene una idea parcial del comportamiento de la rugosidad en la superficie del rodillo de trabajo, sin embargo para tener una idea más precisa de este fenómeno, se requiere de una inspección más completa, la cual se realizó de manera manual, utilizando un rugosímetro de alta definición y trazando la tabla del rodillo después de cada campaña de laminación, tal como se muestra en la Figura 7.4. Para este análisis se dividió la circunferencia del rodillo en 4 partes iguales, realizando la medición tres veces y promediando los valores para calcular la media, la variación de un punto con respecto al resto de los cuadrantes es de $\pm 3\%$.

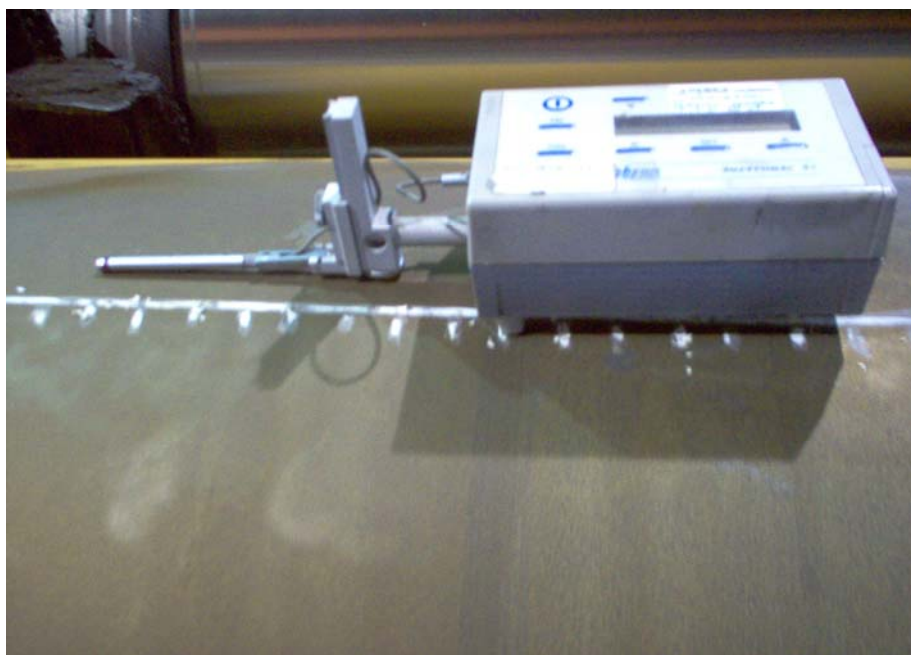
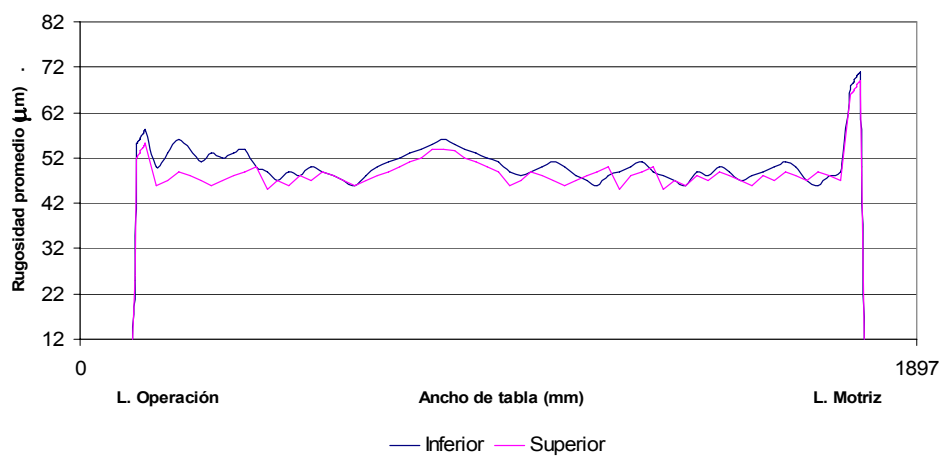


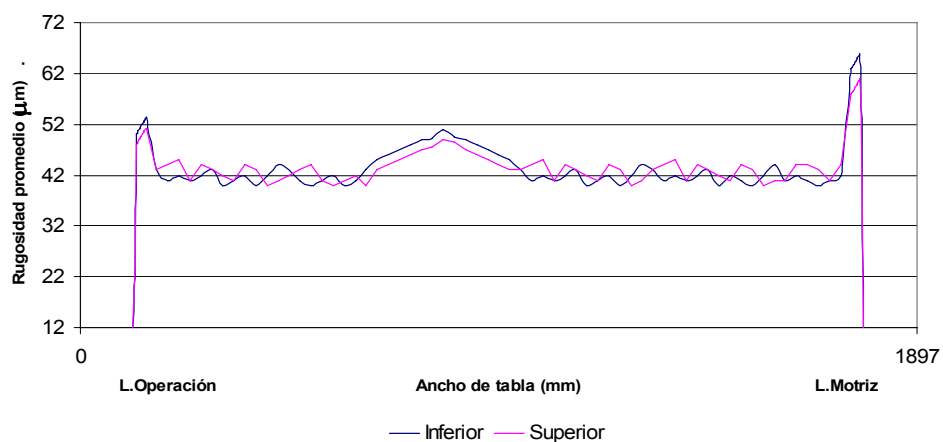
Figura 7.4.- Representación de equipo y trazo del rodillo para la medición de la rugosidad.

Los datos que se muestran en el Anexo V son los obtenidos en la medición de rugosidad realizada a los rodillos indicados en la tabla 7.3, con esta información se construye el perfil de rugosidad que tiene cada rodillo de laminación, el cual se representa en la Figura 7.5a,b y c, en donde se puede observar de manera mas detallada la variación de rugosidad descrita anteriormente para las graficas 7.3 a-f.

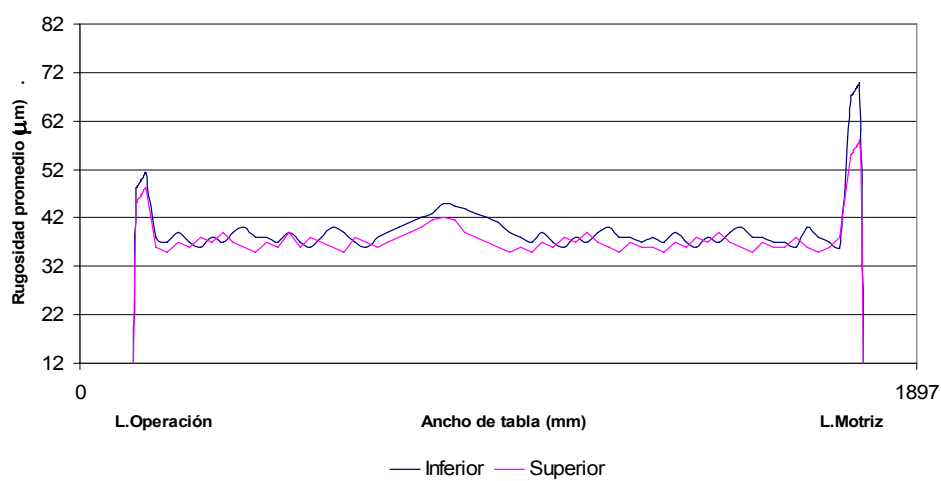
Además de lo comentado con respecto a las rugosidad, con la construcción de estos perfiles de rugosidad se puede observar que en el centro del perfil el valor llega a su límite máximo, pero éste decrece conforme la lámina cambia de castillo, como se puede apreciar en la Figura 7.6, la rugosidad tiene valores promedio de 55, 50 y 43 μm para los castillo, 4, 5 y 6, los cuales laminaron un promedio de 19.55 km, 29.57 km y 36.96 km respectivamente. Con la construcción de estos perfiles se puede predecir el desgaste que se va a manifestar en el proceso de laminación, ya que la rugosidad tiene relación directa al desgaste de los materiales, lo que quiere decir que a mayor rugosidad mayor coeficiente de fricción y, como consecuencia, mayor desgaste [1,3,4].



a) Castillo F-4. Longitud laminada 19.55 km



b) Castillo F-5. Longitud laminada 29.57 km



c) Castillo F-6. Longitud laminada 36.96 km

Figura 7.5.- Representación gráfica de los perfiles de rugosidad promedio.

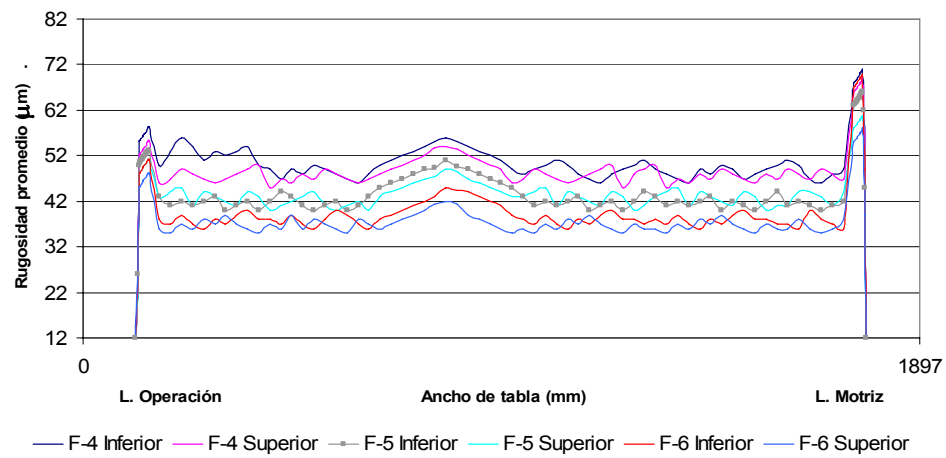


Figura 7.6.- Representación gráfica de los perfiles de rugosidad promedio para los castillos F4, F5 y F6.

7.2.4 Cambios de temperatura registrados en campo.

La laminación en caliente es un proceso en el que la mayor parte del calor se transmite por conducción, sin embargo están involucrados cuerpos en movimiento, como resultado de este movimiento se presenta fricción entre los rodillos y el planchón. Esta fricción significa producción de calor, la velocidad de laminación implica también generación de calor por deformación. La reducción produce fricción y a mayor reducción mayor fricción y mayor generación de calor, la elongación es un resultado de la reducción y está acompañada del deslizamiento del material del planchón contra el rodillo, generando a su vez otra cantidad de calor, igualmente sucede con el ensanchamiento.

Todo este calor de que se habla se desarrolla en una pequeña zona del rodillo a la cual se llamará arco de contacto o área de contacto de los rodillos con la pieza de trabajo. En esta pequeña zona la temperatura superficial del rodillo llega a elevarse en forma súbita a valores de hasta 500°C.

Estas temperaturas pueden reducir la dureza superficial de los rodillos durante el paso del planchón por el arco de contacto, provocando lo que se pudiera llamar un recocido de la superficie. Por esta razón es tan importante el sistema de enfriamiento.

El enfriamiento de los rodillos consiste en aplicar un refrigerante en todo el cuerpo del rodillo, el cual está distribuido en tres arreglos generales compuestos por rociadores. Estas secciones deberán de formar un arreglo asimétrico. La separación de los rociadores en cada sección se recomienda que varíe entre 5 y 8 cm para obtener máxima eficacia.

Las investigaciones más aceptables para disminuir los efectos de la temperatura son aquellas que se basan en las lecturas tomadas de la temperatura al momento que está pasando por el arco de contacto. Se comprende que es muy difícil hacer mediciones y comprobaciones de las condiciones, causas y efectos de lo que sucede en el arco de contacto cuando pasa la pieza de trabajo. Algunas de estas causas y efectos son imposibles de cuantificar y deben de ser estimadas. Para este análisis se tomó la medida de la temperatura cuando los rodillos de laminación terminan su campaña de trabajo, los datos obtenidos se muestran en el Anexo VI, con esta información se construye el perfil de temperatura, el cual se representa en la Figura 7.7.

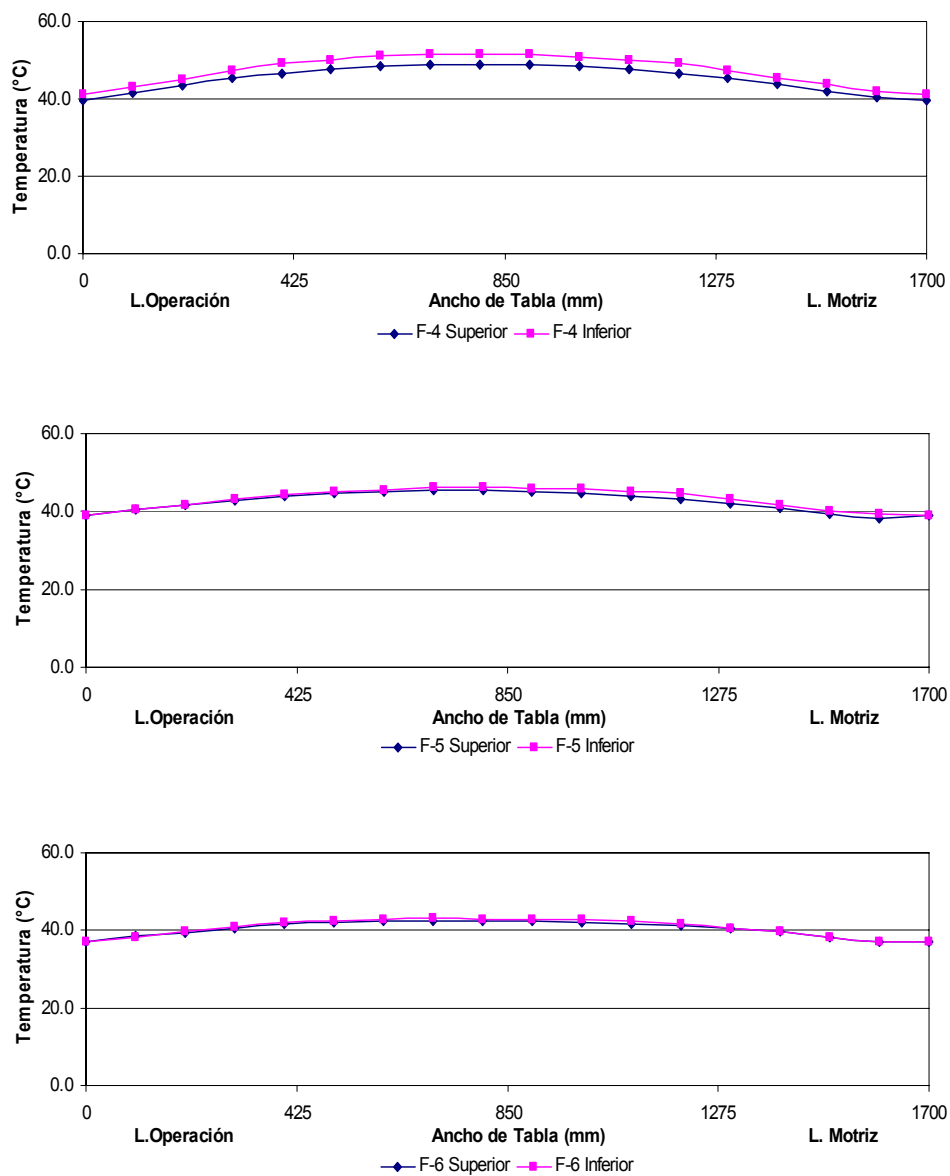


Figura 7.7.- Representación gráfica de los perfiles de temperatura.

Como se puede observar para los tres casos de la Figura 7.7, la temperatura de los rodillos inferiores es mayor que la de los rodillos superiores, así mismo se puede percibir una pequeña disminución en la temperatura de los rodillos del castillo cuatro con respecto al castillo cinco y del castillo cinco con respecto al castillo seis, este se puede apreciar en la Figura 7.8, en la cual se muestran las gráficas generadas, además, esta variación de temperatura se representa en la Tabla 7.5, en la cual se puede apreciar que el porcentaje de variación de temperatura oscila entre el 0.5 y 5.5 %, dependiendo de la posición del rodillo, el punto de inspección y el castillo analizado, para todos los casos la variación se representa con el signo negativo por que la temperatura disminuye conforme se incrementa el número del castillo [3,5,6].

La temperatura superficial inspeccionada fue tomada para todos los rodillos al mismo tiempo, por lo que el margen de error es despreciable.

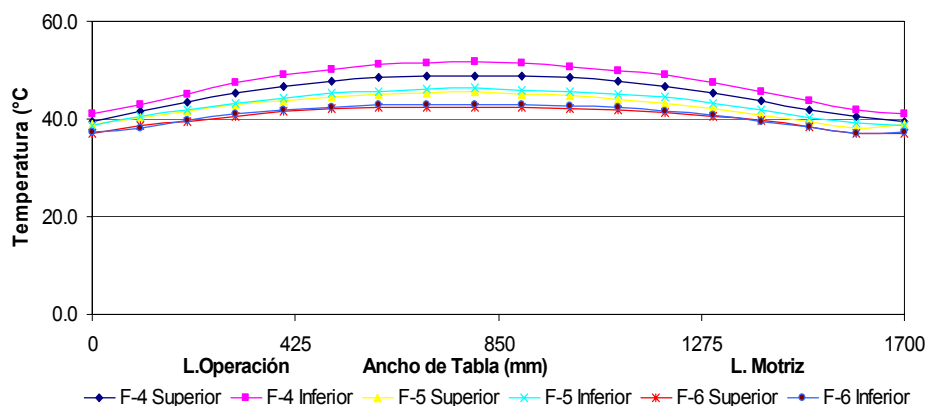


Figura 7.8.- Representación grafica de los perfiles de temperatura para los castillos F4, F5 y F6.

Punto de Inspección (mm)	Superior			Inferior			Superior			Inferior		
	Inspección (°C)			Inspección (°C)			Inspección (°C)			Inspección (°C)		
	F-4	F-5	Variación	F-4	F-5	Variación	F-5	F-6	Variación	F-5	F-6	Variación
0	39.5	39.0	-0.5%	41.2	38.8	-2.4%	39.0	37.1	-1.9%	38.8	37.3	-1.6%
100	41.7	40.4	-1.3%	42.9	40.4	-2.5%	40.4	38.6	-1.8%	40.4	38.2	-2.2%
200	43.6	41.7	-1.9%	45.2	41.8	-3.4%	41.7	39.6	-2.2%	41.8	39.8	-2.0%
300	45.4	43.0	-2.5%	47.4	43.2	-4.2%	43.0	40.5	-2.5%	43.2	41.0	-2.2%
400	46.7	43.8	-2.9%	49.1	44.2	-4.9%	43.8	41.5	-2.3%	44.2	42.0	-2.2%
500	47.8	44.6	-3.2%	50.2	45.3	-4.9%	44.6	42.1	-2.5%	45.3	42.5	-2.8%
600	48.4	45.2	-3.3%	51.1	45.7	-5.5%	45.2	42.3	-2.9%	45.7	43.0	-2.7%
700	48.7	45.4	-3.3%	51.6	46.2	-5.4%	45.4	42.4	-3.0%	46.2	43.0	-3.2%
800	48.9	45.6	-3.3%	51.7	46.4	-5.3%	45.6	42.5	-3.1%	46.4	43.0	-3.5%
900	48.7	45.1	-3.6%	51.4	46.0	-5.4%	45.1	42.4	-2.7%	46.0	43.0	-3.1%
1000	48.7	44.8	-3.9%	50.6	45.7	-4.9%	44.8	42.1	-2.6%	45.7	42.8	-3.0%
1100	47.9	44.1	-3.7%	50.0	45.2	-4.8%	44.1	41.8	-2.4%	45.2	42.5	-2.8%
1200	46.6	43.3	-3.3%	49.1	44.6	-4.6%	43.3	41.3	-2.0%	44.6	41.6	-3.0%
1300	45.3	42.0	-3.3%	47.4	43.2	-4.2%	42.0	40.5	-1.6%	43.2	40.7	-2.5%
1400	43.9	40.9	-3.0%	45.6	41.8	-3.8%	40.9	39.6	-1.2%	41.8	39.6	-2.2%
1500	42.0	39.4	-2.5%	43.8	40.3	-3.5%	39.4	38.3	-1.1%	40.3	38.3	-1.9%
1600	40.5	38.1	-2.4%	41.9	39.2	-2.7%	38.1	37.1	-1.0%	39.2	37.0	-2.2%
1700	39.5	39.0	-0.5%	41.2	38.8	-2.4%	39.0	37.1	-1.9%	38.8	37.3	-1.6%

Tabla 7.5.- Variación de resultados obtenidos en el análisis de temperatura.

7.3 ANALISIS DE DATOS TOMADOS EN PLANTA.

El cuerpo del rodillo de laminación es rectificificado antes de que éste entre al molino, el perfil del cuerpo es variable dependiendo de cada molino en particular, puede ser que algunos molinos requieran que la superficie esté completamente paralela al eje del rodillo, algunos molinos utilizan coronas positivas o negativas y otros más modernos utilizan una combinación de ambas como la que se muestra en la Figura 7.9 , la geometría del cuerpo puede variar considerablemente de un molino a otro, e inclusive en un mismo molino puede utilizar diferente tipo de corona.

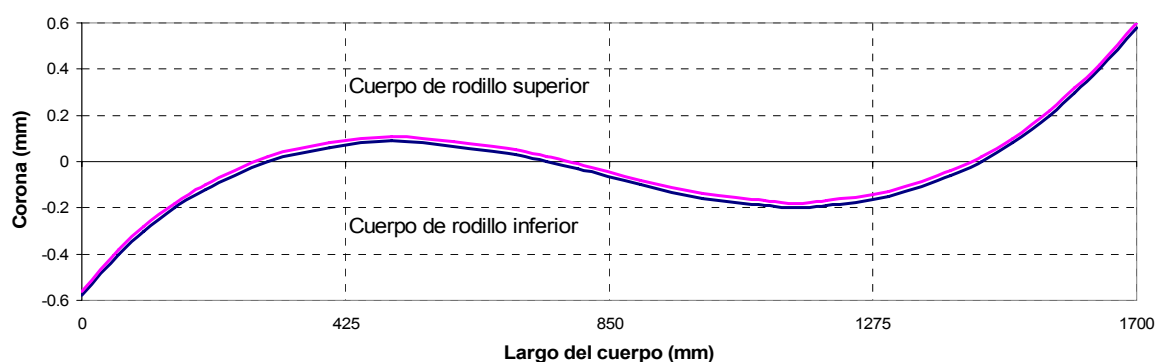


Figura 7.9.- Perfil de rectificado para rodillos de trabajo.

7.3.1 Perfil de desgaste de los rodillos de laminación.

El perfil de desgaste que presentan los rodillos de laminación siguen el mismo patrón para cualquier tipo de molino, independientemente del tipo de corona que utilicen, esto se debe principalmente a las cargas de laminación, la flexión del rodillo y el movimiento axial de los mismos. En la Figura 7.10, se representan de manera individual los perfiles de desgastes que sufre una pareja de rodillos en los castillos 4,5 y 6 respectivamente. En la Figura 7.11, se representan de manera general los perfiles de desgaste de los mismos 3 castillos, en donde se puede apreciar la diferencia que existe de un castillo con respecto a los otros dos.

Los datos con los que se realizaron las gráficas de estos perfiles, se encuentran en el Anexo VII y corresponden a la pareja de rodillos VITE-153 y VITE-154 [1-4].

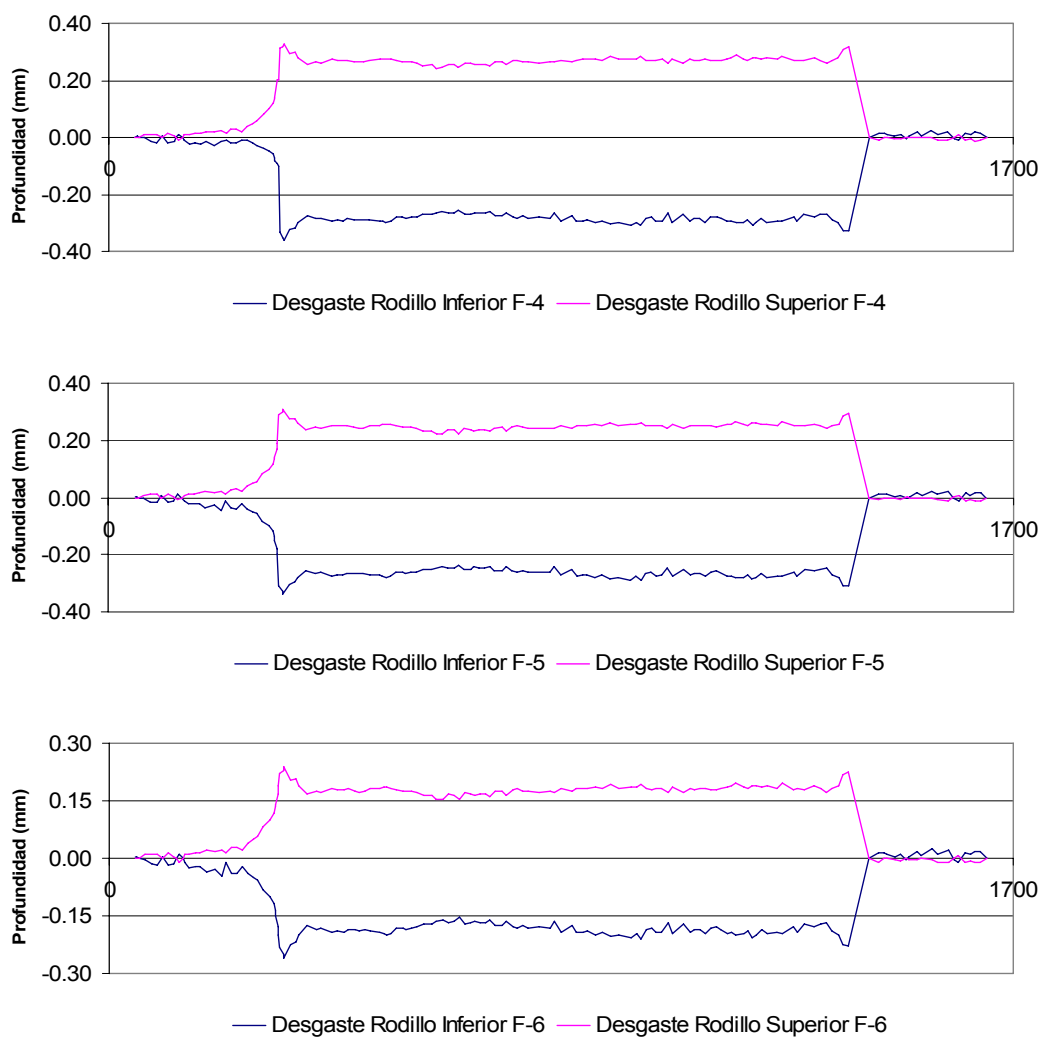


Figura 7.10.- Perfil de desgastes generado después de una campaña de laminación.

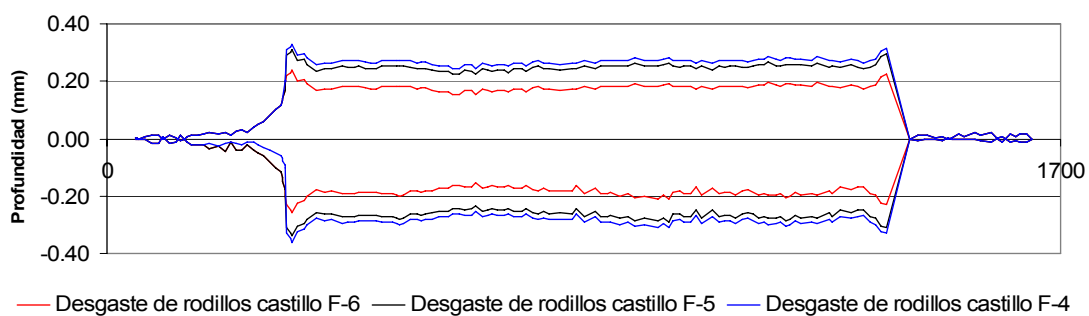


Figura 7.11.- Comparación de los perfiles de desgastes en los castillos 4,5 y 6.

En la Figura 7.11 se puede observar que todas las graficas de desgaste presentan el mismo perfil de desgaste, la geometría que se obtiene al final de la campaña de laminación es similar sin importar si el rodillo es superior o inferior o si este trabajo en el castillo 4,5 ó 6, sin embargo para todos los casos se puede observar que en los extremos del perfil de desgaste se generan dos picos que sobresalen del perfil, este pico Vladimir B. Ginzburg [1], denomina a estos picos como esfuerzo localizado y en su estudio establece que tiene un valor escalar de 1.3 veces el promedio del desgaste.

En el presente estudio, este fenómeno se presenta de manera normal y se vuelve crítico cuando, en la campaña de laminación, se produce lámina con calibres muy delgados, se excede el kilometraje laminado o el producto procesado corresponde a un acero de alta resistencia.

Este fenómeno es muy conocido en el proceso de laminación en caliente y se ha establecido que el principal problema que se genera con este desgaste excesivo por esfuerzo localizado es el problema de planeza y forma de la lámina procesada [1,7].

7.3.2 Variables que influyen en el cambio de rodillos por desgaste.

Los cambios de rodillos en cada molino de laminación son muy variables, este cambio no tiene un patrón definido ya que esta en función de las condiciones de operación así como de las propiedades de los materiales que se procesan. En las Tablas 7.6 a-c se muestra un resumen general de los resultados obtenidos para una pareja de rodillos desde su inicio hasta el final de su vida.

Fecha	Fuerza de laminación (Ton) F-4	No. Piezas roladas	Diámetro de rodillo (mm)	Km. Rolados	Ton. Roladas	Desgaste (mm)	Material rectificado (mm)	Rectificado + Desgaste (mm)	Rendimiento	
									Ton/mm	Km/mm
16-Feb-05	521321.02	69	501.389	20.63	1421.47	0.398950	0.162	0.561	2533.81	36.77
16-Feb-05	461201.07	35	500.828	25.83	632.33	0.448290	0.601	1.049	602.79	24.62
18-Feb-05	538040.15	49	499.118	24.08	791.48	0.483360	0.214	0.697	1135.55	34.55
22-Feb-05	483262.08	49	496.070	18.87	758.19	0.387820	0.199	0.587	1291.64	32.15
25-Feb-05	510519.64	50	495.483	24.13	790.00	0.509760	0.574	1.084	728.78	22.26
26-Feb-05	510046.85	51	494.399	14.38	990.53	0.292190	0.252	0.544	1820.83	26.43
02-Mar-05	507080.31	47	490.793	16.28	731.06	0.339680	0.437	0.777	940.88	20.95
03-Mar-05	402767.20	40	489.342	20.53	649.50	0.399080	0.119	0.518	1253.86	39.63
04-Mar-05	402832.49	40	488.824	20.40	646.04	0.397460	0.374	0.771	837.92	26.46
05-Mar-05	576134.42	56	488.053	20.81	994.11	0.427130	0.284	0.711	1398.19	29.27
06-Mar-05	655816.55	62	487.342	18.91	1012.44	0.401300	0.075	0.476	2126.97	39.73
06-Mar-05	371040.69	34	486.866	15.97	588.59	0.307650	0.709	1.017	578.75	15.70
12-Mar-05	574640.65	53	480.369	19.55	914.68	0.441350	0.523	0.964	948.84	20.28
15-Mar-05	397987.75	42	479.405	14.17	641.19	0.306180	0.208	0.514	1247.45	27.57
16-Mar-05	683258.78	50	478.891	33.50	875.75	0.655220	0.726	1.381	634.14	24.26
19-Mar-05	576784.75	52	476.320	19.36	898.60	0.434010	0.654	1.088	825.92	17.79
Total		779		327.40	13335.96	6.629430	6.111	12.739	18906.33	438.43
Promedio		49		20.46	833.50	0.414339	0.382	0.796	1181.65	27.40

Tabla 7.6 a.- Resumen de resultados obtenidos para una pareja de rodillos en el castillo F-4.

Fecha	Fuerza de laminación (Ton) F-5	No. Piezas roladas	Diámetro de rodillo (mm)	Km. Rolados	Ton. Roladas	Desgaste (mm)	Material rectificado (mm)	Rectificado + Desgaste (mm)	Rendimiento	
									Ton/mm	Km/mm
25-Mar-05	336077.07	36	472.420	35.35	632.14	0.393840	0.994	1.388	455.43	25.47
26-Mar-05	564315.89	58	471.032	34.54	1001.64	0.459620	0.423	0.883	1134.36	39.12
29-Mar-05	389750.25	42	470.149	29.60	663.79	0.356450	0.581	0.937	708.42	31.59
01-Abr-05	340812.00	29	469.212	22.17	474.18	0.261260	0.306	0.567	836.30	39.10
03-Abr-05	457582.80	50	468.645	28.55	869.52	0.392940	1.223	1.616	538.07	17.67
08-Abr-05	655933.50	62	467.029	30.36	889.73	0.397150	0.785	1.182	752.73	25.69
08-Abr-05	479434.90	47	465.847	45.29	770.51	0.519330	1.001	1.520	506.91	29.80
09-Abr-05	610121.78	51	464.327	28.80	868.91	0.380780	0.479	0.860	1010.36	33.49
10-Abr-05	400488.13	46	463.467	25.00	778.01	0.299130	0.931	1.230	632.53	20.33
10-Abr-05	274268.26	36	462.237	16.23	623.75	0.204570	0.294	0.499	1250.00	32.53
11-Abr-05	475686.79	48	461.738	48.69	819.88	0.563890	0.430	0.994	824.83	48.98
13-Abr-05	411067.62	44	460.744	31.59	674.10	0.405990	0.375	0.781	863.12	40.45
15-Abr-05	617273.23	49	459.963	54.51	923.22	0.666910	0.758	1.425	647.87	38.25
18-Abr-05	466438.39	57	458.538	27.04	851.91	0.379690	0.245	0.625	1363.06	43.26
19-Abr-05	300031.58	37	457.913	28.47	609.39	0.348770	0.312	0.661	921.92	43.07
20-Abr-05	623304.20	54	457.252	53.02	957.43	0.643510	0.389	1.033	926.84	51.33
20-Abr-05	265362.37	29	456.219	18.80	478.67	0.237500	0.433	0.670	714.43	28.06
21-Abr-05	510970.31	48	455.549	54.21	879.16	0.631480	0.974	1.605	547.76	33.78
22-Abr-05	473520.02	48	453.944	30.59	844.54	0.378910	0.553	0.932	906.16	32.82
24-Abr-05	522433.96	64	453.012	25.88	1127.86	0.348520	0.292	0.641	1759.53	40.37
25-Abr-05	531855.56	52	452.371	52.31	941.25	0.624660	0.133	0.758	1241.75	69.01
25-Abr-05	421470.78	55	451.613	23.81	868.72	0.340110	0.835	1.175	739.34	20.26
26-Abr-05	422080.94	43	450.438	28.96	787.91	0.381950	0.338	0.720	1094.32	40.22
27-Abr-05	386055.77	35	449.718	41.26	649.35	0.252000	0.063	0.315	2061.43	130.98
28-Abr-05	550769.64	54	449.403	29.57	940.65	0.418550	0.133	0.758	1240.96	39.01
Total		1174		844.60	19926.22	10.287510	13.280	23.775	23678.45	994.63
Promedio		47		33.78	797.05	0.411500	0.531	0.951	947.14	39.79

Tabla 7.6 b.- Resumen de resultados obtenidos para una pareja de rodillos en el castillo F-5.

Fecha	Fuerza de laminación (Ton) F-6	No. Piezas roladas	Diámetro de rodillo (mm)	Km. Rolados	Ton. Roladas	Desgaste (mm)	Material rectificado (mm)	Rectificado + Desgaste (mm)	Rendimiento	
									Ton/mm	Km/mm
17-Feb-05	358712.02	48	499.779	38.91	782.47	0.282710	0.378	0.661	1183.77	58.87
19-Feb-05	306993.67	46	498.421	45.67	737.53	0.319470	0.340	0.659	1119.17	69.30
20-Feb-05	462523.46	71	497.762	28.76	1140.94	0.217770	0.809	1.027	1110.94	28.00
20-Feb-05	420117.49	61	496.735	28.80	910.43	0.213910	0.451	0.665	1369.07	43.31
27-Feb-05	448643.51	56	493.855	41.58	859.40	0.301270	0.254	0.555	1548.47	74.92
27-Feb-05	377841.74	51	493.300	29.50	785.28	0.232560	0.622	0.855	918.46	34.50
28-Feb-05	271448.23	40	492.445	21.89	587.44	0.167900	0.317	0.485	1211.22	45.13
28-Feb-05	534074.45	50	491.960	76.78	890.16	0.517400	0.150	0.667	1334.57	115.11
01-Mar-05	418123.51	60	491.293	42.30	854.53	0.324020	0.176	0.500	1709.06	84.60
02-Mar-05	353644.74	36	490.016	50.78	640.83	0.345830	0.328	0.674	950.79	75.34
07-Mar-05	367172.29	44	485.849	49.00	737.51	0.339310	1.738	2.077	355.08	23.59
10-Mar-05	339687.29	51	483.772	50.00	751.47	0.372550	0.297	0.670	1121.60	74.63
11-Mar-05	308583.03	39	483.102	44.03	662.46	0.305990	2.427	2.733	242.39	16.11
18-Mar-05	537279.41	52	477.510	51.46	945.15	0.400630	0.215	0.616	1534.33	83.54
18-Mar-05	400774.17	40	476.894	53.64	666.01	0.390270	0.184	0.574	1160.30	93.45
20-Mar-05	458532.71	62	475.232	34.41	1086.29	0.274100	0.436	0.710	1529.99	48.46
21-Mar-05	433267.51	44	474.522	57.87	743.43	0.413890	0.181	0.595	1249.46	97.26
23-Mar-05	515861.79	66	473.927	50.78	1061.83	0.414380	0.643	1.057	1004.57	48.04
24-Mar-05	511525.29	54	472.870	42.41	920.87	0.319520	0.130	0.450	2046.38	94.24
Total		971		838.57	15764.03	6.153480	10.076	16.230	22699.61	1208.42
Promedio		51		44.14	829.69	0.323867	0.530	0.854	1194.72	63.60

Tabla 7.6 c.- Resumen de resultados obtenidos para una pareja de rodillos en el castillo F-6.

Las campañas de laminación son variables para cada pareja de rodillos, en la Figura 7.12, se representa el número promedio de campañas de laminación para la pareja de rodillos analizada, sin embargo este patrón puede variar dependiendo de las necesidades de operación y está en función del número total de parejas de rodillos que estén en uso, lo que quiere decir que en algunos casos el mayor número de campañas pudiera presentarse en el castillo 4 ó 6 y no necesariamente en el castillo 5 como se muestra en la Figura 7.12. Es casi imposible obtener resultados en los cuales la variación de las campañas de laminación sea cero, esto se debe a que los movimientos de los rodillos se van programando de acuerdo a las necesidades de producción en los molinos y algunas veces los rodillos trabajan más en el castillo cuatro que es donde sufren mayor desgaste y, por lo tanto, el número de campañas de laminación promedio disminuye considerablemente. Para este caso la diferencia de campañas de un castillo con respecto a los otros dos es de 36%, y puede llegar hasta un 50% sin que exista problema alguno en el proceso debido a la flexibilidad que permite el acomodo de chumaceras en el castillo para conservar la línea de paso.

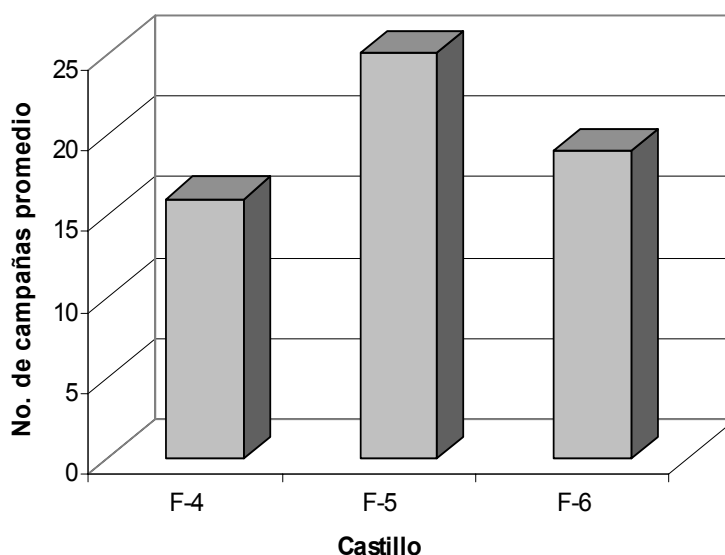


Figura 7.12.- Número de campañas de laminación promedio.

El número de rollos laminados en cada campaña está en función de las dimensiones y propiedades del material laminado, en algunas ocasiones coinciden estos dos factores y se logran programar campañas de laminación muy largas, incrementándose significativamente el número de rollos laminados por campaña, el principal factor por el cual se debe de suspender la campaña es debido al cambio de ancho de cinta en los trenes de laminación convencionales. Como se puede observar en la Figura 7.13, la diferencia en el promedio de rollos laminados es muy pequeña y esto se debe a que la programación de la producción debe de ser lo más precisa posible para evitar paros innecesarios en el molino de laminación, lo que quiere decir que se deben de programar los cambios de rodillos del castillo 4 al 6 al mismo tiempo.

En la industria metal mecánica se le da el nombre de Cono de Laminación al lote de rollos programados para una campaña, esto se debe a que se programan para laminar primero los anchos de mayor dimensión y se va disminuyendo hasta llegar al ancho menor, esto provoca que en el rodillo de laminación se identifique un pequeño ángulo en el desgaste de los rodillos que asemeja un pequeño cono. Para este caso la variación en la cantidad de rollos promedio por campaña es de 8% de un castillo con respecto a los otros dos, sin embargo esto no quiere decir que existe algún factor que influye en el desgaste de rodillos.

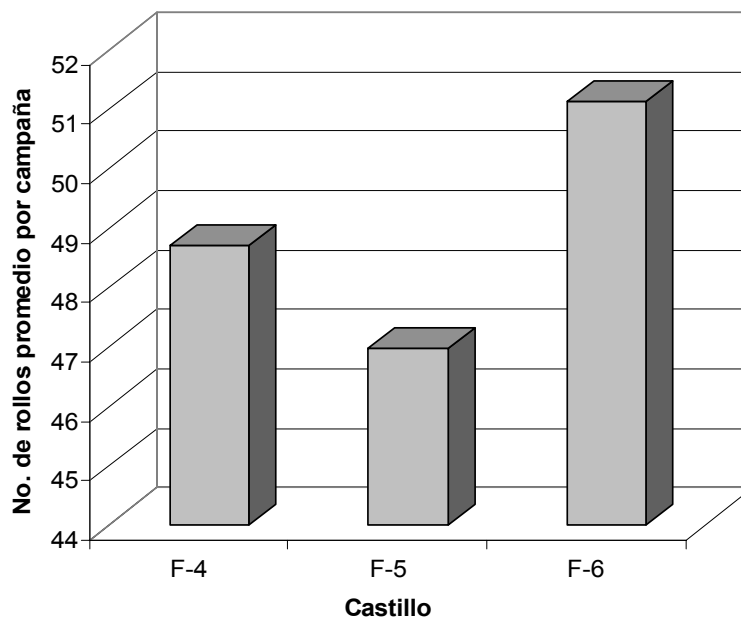
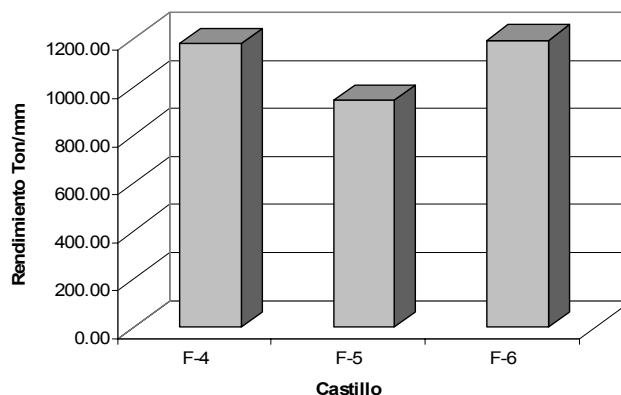
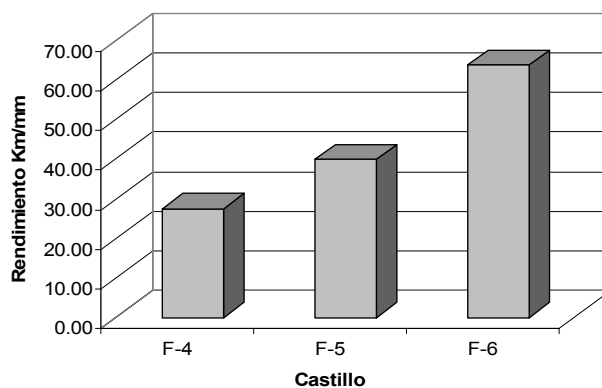


Figura 7.13.- Número de rollos promedio por campaña de laminación.

Hay dos formas de medir el rendimiento de los rodillos de laminación. La primera opción es referirlo en función al tonelaje producido y la segunda es relacionándolo con la longitud laminada. Es más común utilizar la primera opción para determinar la productividad del rodillo, sin embargo, la segunda opción establece un control más preciso debido a que para su cálculo se considera el espesor de la lámina y la velocidad angular del rodillo. Las Figuras 7.14a y b, nos muestran los rendimientos obtenidos para la pareja de rodillos analizada, en la cual se puede apreciar que la tendencia no es la misma para ambos casos. Algunos autores relacionan la productividad con el desgaste de los rodillos de laminación, sin embargo se puede apreciar que no existe alguna relación directa que satisfaga ambas opciones de análisis mostradas en las Figuras 7.14a y b. Para el desarrollo del modelo matemático se consideran algunos criterios de ambos casos los cuales están implícitos en las variables utilizadas para el cálculo de desgaste.



a) Toneladas por milímetro.



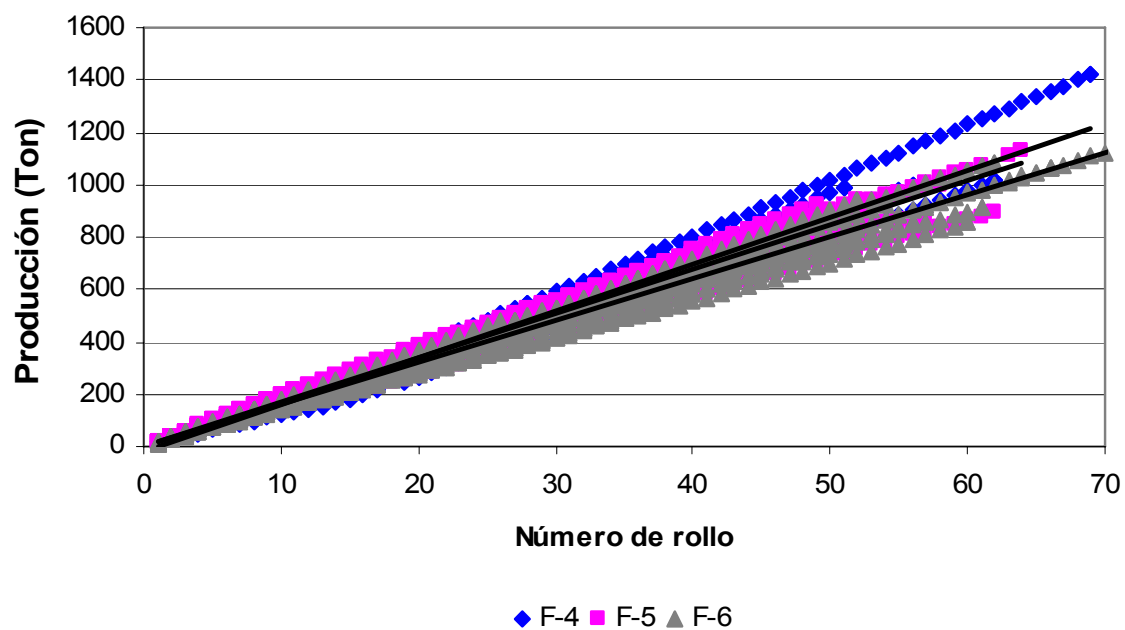
b) Kilómetros por milímetro.

Figura 7.14.- Rendimientos obtenidos en toda la vida útil de la pareja de rodillos analizada.

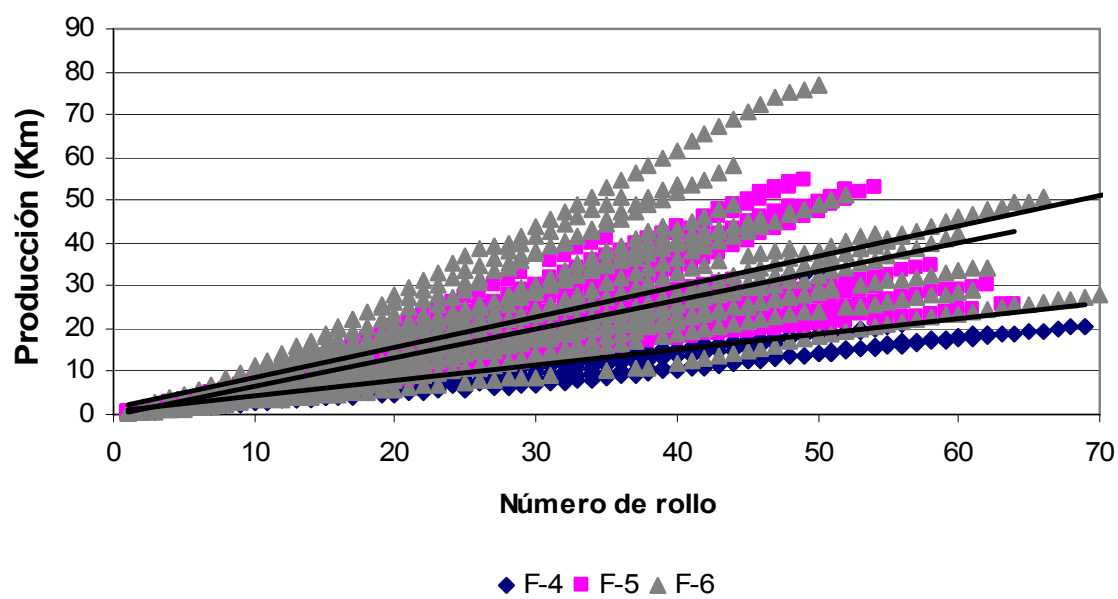
Las Figuras 7.15a y b, representan la tendencia que manifiesta la productividad en relación al número de rollos procesados. Para la Figura 7.15a, se considera el tonelaje producido y para la Figura 7.15b se considera la longitud laminada, la cual es un valor más exacto, sin embargo para ambos casos se puede apreciar que la tendencia es la misma, la productividad en toneladas o kilómetros tiende a incrementarse conforme se incrementa el número de rollos.

Es lógico llegar a la conclusión que a mayor cantidad de rollos mayor producción, sin embargo si se comparan las dos figuras y se observa la tendencia que manifiestan, se puede observar que ésta varía considerablemente de un castillo con respecto al otro, también se puede apreciar que en la Figura 7.15a, la variación es mucho menor comparándola con la variación de la Figura 7.15b, lo que se debe a que en los valores utilizados para la construcción de la Figura 7.15a, se consideran menos variables, como por ejemplo las velocidades angulares y los espesores laminados; no es lo mismo producir 200 toneladas con 10 rollos calibre 14, a producir las mismas 200 toneladas con 10 rollos calibre 16. El calibre 14 tiene un espesor de 1.90 mm y el calibre 16 tiene un espesor de 1.52 mm según la norma ASTM, lo cual quiere decir que para producir el calibre mas delgado se requieren mayores porcentajes de reducción, mayores cargas de laminación y mayores velocidades de los rodillos; estas variables influyen de manera directa en la construcción de la gráfica de la Figura 7.15b, pero no son considerados en la Figura 7.15a.

El margen de error entre ambas figuras oscila alrededor del 15%, lo cual influye de manera directa en el análisis realizado. Pero lo cual es recomendable el análisis considerando la longitud de la lámina para mayor precisión.



a) Análisis considerando peso (Ton.).



b) Análisis considerando longitud (Km).

Figura 7.15.- Tendencia de productividad en función del número de rollos.

El espesor laminado y la fuerza de laminación son dos variables que dependen la una de la otra, lo que quiere decir que para producir lámina con menores espesores se requiere de mayor fuerza de laminación y viceversa. En la Figura 7.16 se representan los espesores que se laminaron con la pareja de rodillos analizada, en la cual se puede resumir que el espesor disminuye conforme la lámina avanza de castillo, en el castillo cuatro el espesor promedio es de 4.61 mm, en el castillo cinco es de 3.25 mm y en castillo seis el espesor es de 2.18 mm, si se habla de porcentajes de reducción se tiene que del castillo cuatro al castillo cinco existe un 29.51% de reducción mientras que del castillo cinco al castillo seis el porcentaje de reducción es de 23.21%.

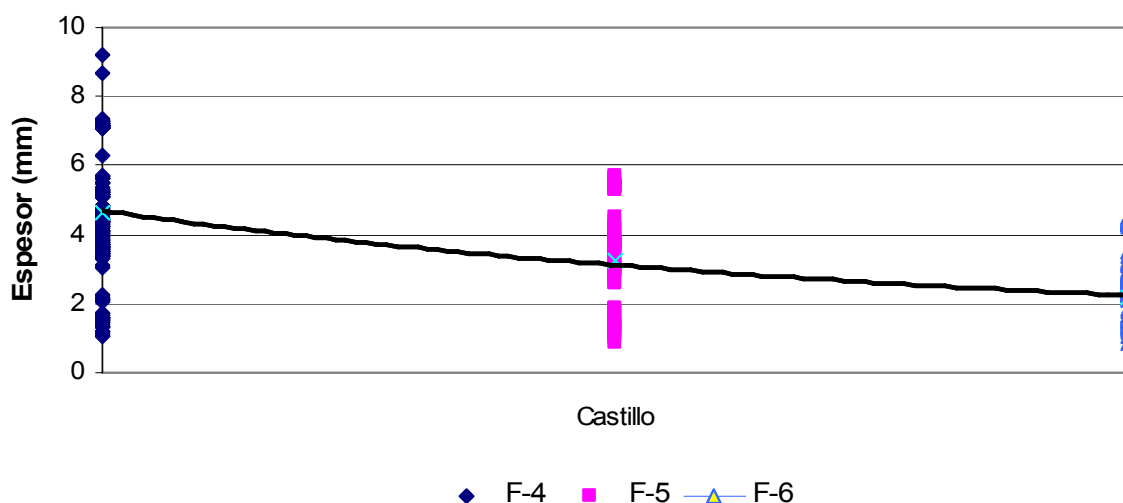


Figura 7.16.- Resumen de espesores laminados para los castillos 4,5 y 6.

Como se mencionó anteriormente, la fuerza de laminación está en función del espesor laminado, es lógico pensar que las fuerzas tendrán la misma tendencia de la Figura 7.16. Para este análisis se construyó la Figura 7.17, representando las fuerzas de laminación para cada uno de los castillos y, efectivamente, se puede confirmar que las tendencias de ambas gráficas es la misma, con pequeñas variaciones ya que en la Figura 7.17 la fuerza promedio es de 10.88 MN para el castillo cuatro, 10.32 MN para el castillo cinco y 9.42 MN para el castillo seis. Hablando en porcentaje, la reducción de la fuerza del castillo cuatro con respecto al castillo cinco es de 5.17% y del castillo cinco con respecto al castillo seis es de 8.26%.

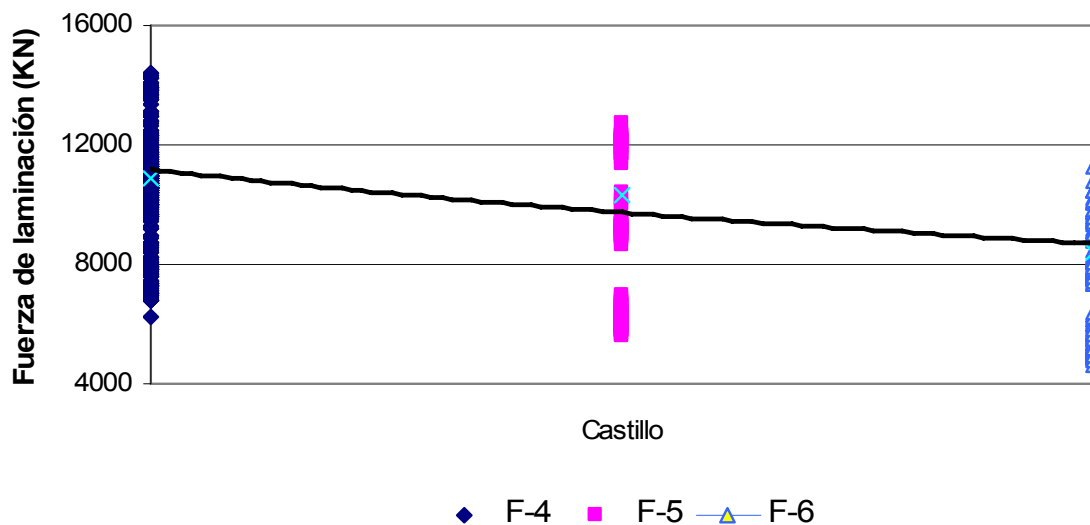


Figura 7.17.- Resumen de fuerzas de laminación para los castillos 4,5 y 6.

Si se analiza la fuerza de laminación por castillo se puede observar como se comporta la fuerza en función del espesor laminado, para todos los casos la tendencia es la misma, la fuerza es mayor para espesores mas pequeños, en la Figura 7.18, se puede apreciar que este comportamiento es el mismo para los castillos cuatro, cinco y seis, si se calcula la pendiente de la línea de la tendencia se llega a la conclusión de que para el castillo cuatro la ecuación de la tendencia es $Y = -650.06X + 14169$ en donde el ángulo que forma la tendencia con el eje horizontal es de 89.91° , para el castillo cinco la ecuación de la línea es $Y = -842.54X + 12464$ para el cual el ángulo es de 89.93° y por último la ecuación de la línea de la tendencia para el castillo seis es $Y = 1023X + 11268$ cuyo ángulo es de 89.94° . Como se puede comprobar el ángulo de un castillo con respecto a los otros dos es tan pequeño que se puede despreciar.

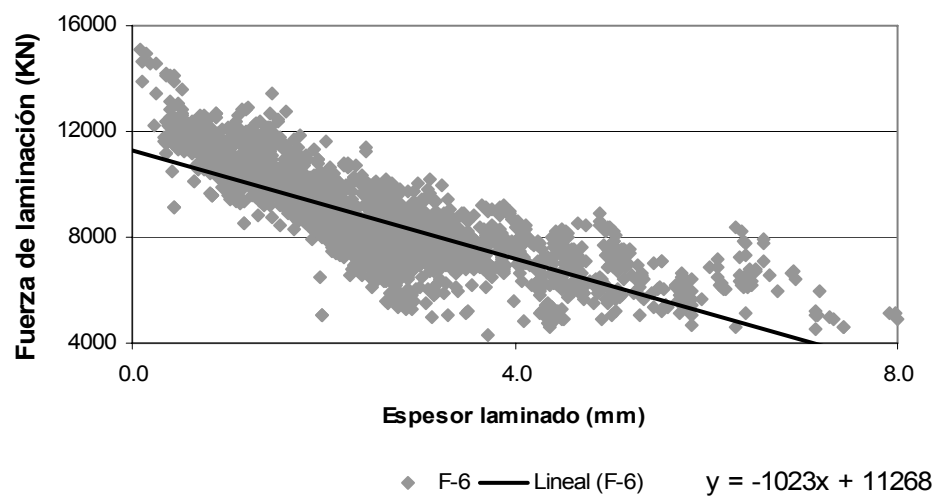
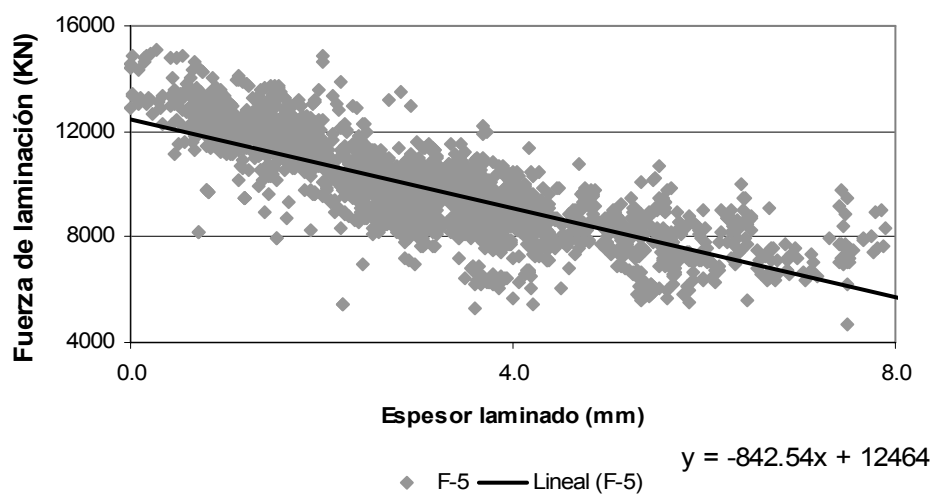
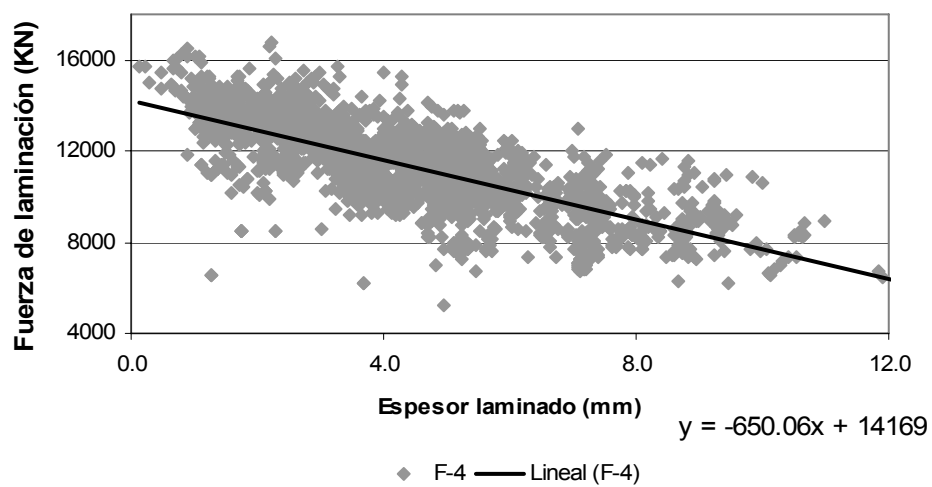


Figura 7.18.- Relación de fuerza de laminación – espesor.

En la Figura 7.19 se puede apreciar la diferencia de cada una de las tendencias con respecto a las otras dos, donde se puede confirmar que efectivamente la fuerza de laminación varía en proporción inversa al espesor laminado.

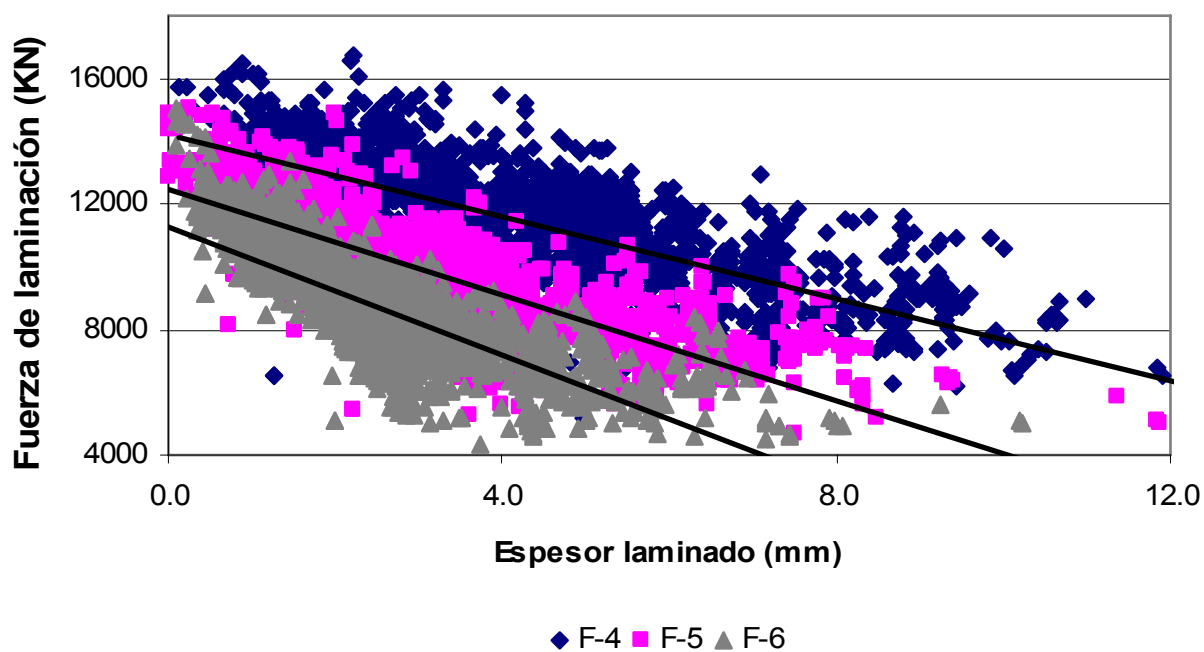


Figura 7.19.- Representación general de la relación fuerza de laminación – espesor.

Otra variable de interés es el arco de contacto, el cual es la superficie que toca de manera directa a la lámina, esta variable tiene relación directa con los porcentajes de reducción y espesores laminados, ya que entre mayores sean los porcentajes de reducción el arco de contacto será también mayor. La Figura 7.20 muestra como el arco de contacto es mayor para el castillo cuatro, posteriormente el castillo cinco y por último el castillo seis. Esto se debe a que los porcentajes de reducción son mayores en el mismo orden que se mencionó anteriormente. La relación del arco de contacto es directamente proporcional al porcentaje de reducción, por lo que los valores obtenidos son muy parecidos a los mencionados anteriormente, estos valores en el castillo cuatro el arco de contacto promedio es de 25.84 mm, en el castillo cinco es de 16.55 mm y en castillo seis el arco de contacto es de 11.34 mm, si se habla de porcentajes de reducción para el arco de contacto se tiene que del castillo cuatro al castillo cinco existe un 35.96% de reducción mientras que del castillo cinco al castillo seis el porcentaje de reducción es de 20.16%.

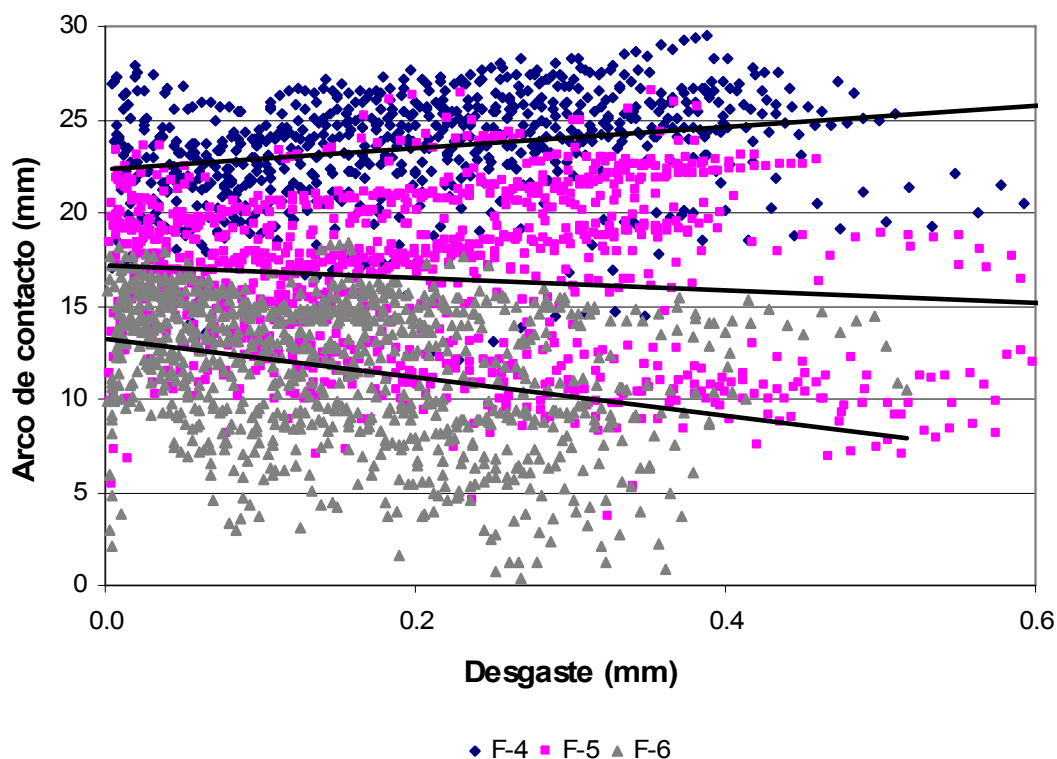


Figura 7.20.- Relación del arco de contacto con el desgaste.

Los rodillos de laminación son rectificados después de cada campaña de laminación para eliminar el material fatigado térmica o mecánicamente. La Figura 7.21 muestra gráficamente los valores de desgaste y material rectificado que se obtuvieron en los diferentes castillos para la pareja de rodillos analizada. Es muy importante hacer esta aclaración ya que el material rectificado representa el 58% de la vida útil de un rodillo de laminación, además de que este material no es considerado como desgaste para el cálculo de coeficientes de desgaste [1,2].

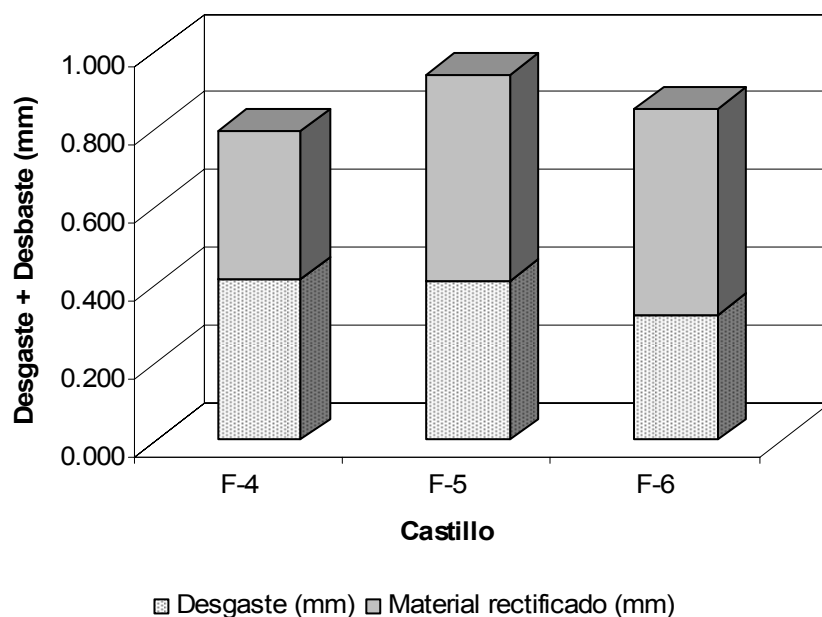


Figura 7.21.- Material promedio removido en cada campaña de laminación.

B.M Kapadia[2], presentó su estudio en donde mostró la formación y profundidad de capas superficiales generadas en un rodillo de laminación en caliente, estableciendo que el material dañado mecánicamente está en función de la corrosión, deformación, agrietamiento y fatiga, y concluyó afirmando que las capas de material fatigado tienen la misma profundidad del material que se desgasta en el proceso de laminación.

No existe una relación directa del material fatigado con el material que se desgasta en el rodillo de laminación, como se puede ver en la Figura 7.22, no hay una tendencia específica para cada uno de los castillos analizados, en algunos casos el material rectificado se incrementa aunque el material desgastado sea menor y viceversa, esto se debe a las variables del proceso de laminación, por ejemplo cuando se producen menores espesores de lámina, el trabajo mecánico es mucho mayor y no es proporcional al desgaste, o en algunos otros casos la temperatura de laminación es mayor provocando mayor fatiga térmica y por lo tanto el material rectificado será mayor aunque el desgaste haya sido muy pequeño. Como medida de seguridad para el rectificado de rodillos se ha establecido que el material rectificado debe de ser igual o mayor en 10% que el material desgastado.

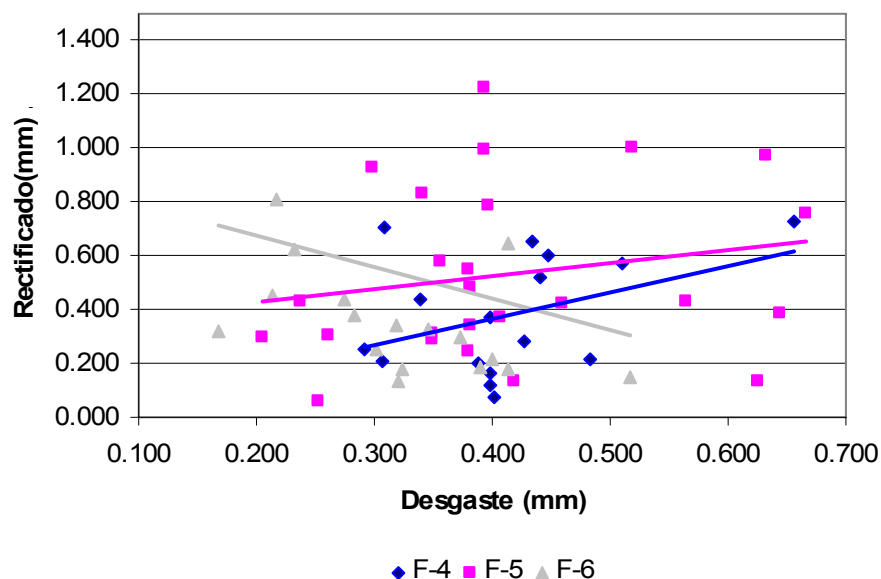
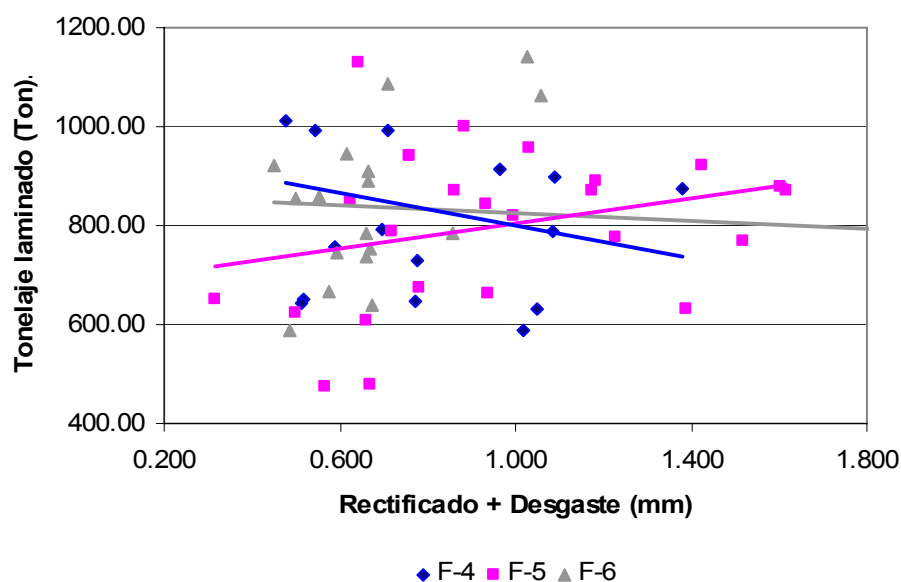
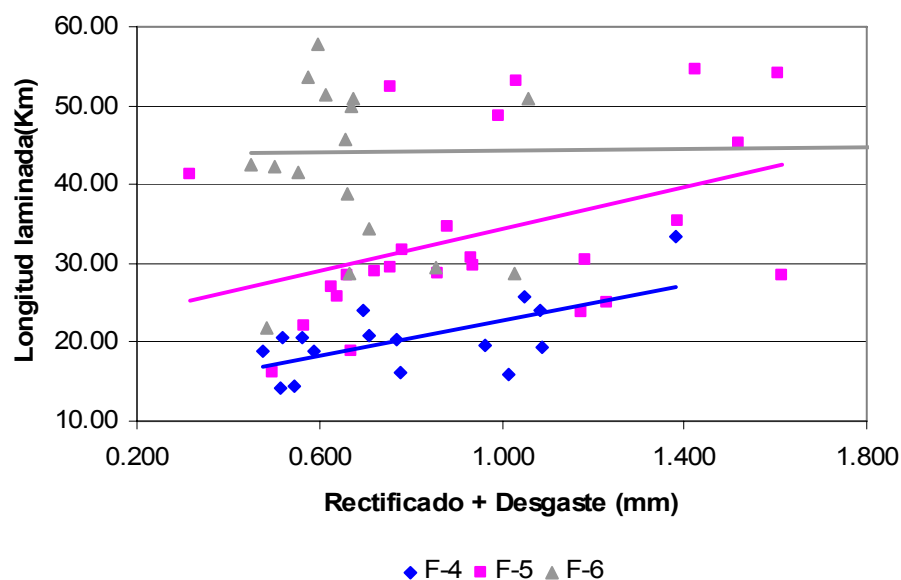


Figura 7.22.- Análisis del material rectificado en función del desgaste.

Las Figuras 7.23a y b representan gráficamente el material que se utiliza por campaña de laminación en función al tonelaje y kilometraje laminado respectivamente, como se puede observar la tendencia es muy variable para el caso de análisis con tonelaje producido y permanece más estable para el análisis de longitud laminada, como se dijo anteriormente para el análisis de desgaste es recomendable utilizar las variables que influyen para el cálculo de longitud laminada, disminuyendo el margen de error en un 15% [1,2].



a) Análisis considerando tonelaje laminado.



b) Análisis considerando longitud laminada.

Figura 7.23.- Tendencia para el consumo de material por campaña de laminación.

7.4 COMPARACION DE RESULTADOS CON MODELO DE CONTROL Y GRAFICAS.

En el desarrollo del modelo matemático que se analizó en el Capítulo 6, se estableció la ecuación de desgaste (6.15) la cual está definida por:

$$h = \sum_1^n K_{abr1} \left[\frac{6PE_1^{*2}}{\pi^2 Wl} \right]^{\frac{1}{3}} L \frac{l}{\pi D_1} + \sum_1^n K_{abr2} \left[\frac{6PE_2^{*2}}{\pi^3 R^2} \right]^{\frac{1}{3}} L \frac{D_1}{D_2} \quad (7.1)$$

En donde:

K_{abr1} = Coeficiente de desgaste abrasivo entre el rodillo de trabajo y la lámina (mm^3/kNm).

K_{abr2} = Coeficiente de desgaste abrasivo entre los rodillos de apoyo y trabajo (mm^3/kNm).

P = Fuerza de laminación (kN).

R = Radio relativo de curvatura (mm).

E_1^* = Módulo elástico efectivo entre el rodillo de trabajo y la lámina (MPa).

E_2^* = Módulo elástico efectivo entre los rodillos de trabajo y apoyo (MPa).

L = Longitud total de la lámina (km).

W = Ancho de la lámina (mm).

l = Arco de contacto (mm).

n = Número de rollos procesados

D_1 = Diámetro del rodillo de trabajo (mm).

D_2 = Diámetro del rodillo de apoyo (mm).

También en el Capítulo 6 se estableció el cálculo de los coeficientes de desgaste, los cuales son [3,4]:

Castillo	K_{abr1} (mm^3/KNm)	K_{abr2} (mm^3/KNm)
F-4	0.00353182	0.00017512
F-5	0.00221877	0.00014668
F-6	0.00174053	0.00014427

Tabla 7.7.- Valores de coeficientes de desgaste.

La fuerza de laminación, ancho de la lámina, diámetro de rodillo de apoyo y diámetro de rodillo de trabajo, son valores que se establecen en la hoja de producción de cada proceso en el molino de laminación. Los espesores que se deben de procesar en cada castillo o porcentajes de reducción son variables que se encuentran de manera implícita en el modelo, por lo cual también se deben de especificar en el proceso de laminación [1,2].

El radio relativo de curvatura R , se especificó en la ecuación (6.4) del Capítulo seis, de la cual, despejando el radio queda de la siguiente manera:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.2)$$

Los valores de los radios de los rodillos de trabajo y apoyo van a estar cambiando continuamente dependiendo de la línea de paso y castillo donde trabaje; por lo cual el radio relativo de curvatura cambia en cada campaña de laminación.

El modulo elástico efectivo entre los rodillos de trabajo y apoyo se especificó en la ecuación (6.6) del Capítulo seis, de la cual, despejando el módulo queda de la siguiente manera:

$$E_2^* = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2 - (E_1 \nu_2^2) - (E_2 \nu_1^2)} \quad (7.3)$$

En donde el valor del módulo de elasticidad del rodillo de trabajo $E_1=180$ MPa, el módulo de elasticidad del rodillo de apoyo $E_2=200$ MPa y los módulos de poisson ν_1 y ν_2 son de 0.28 y 0.3 respectivamente [10].

El módulo elástico efectivo entre el rodillo de trabajo y la lámina se especifico en la ecuación (6.7) del Capítulo seis, de la cual despejando, el modulo nos queda de la siguiente manera [8,9]:

$$E_1^* = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \quad (7.4)$$

Aplicando las formulas (7.4) y (7.5) para determinar los módulos elásticos efectivos para el proveedor Acos Villares S.A, se determina que $E = 103.48158 \times 10^6 Pa$ y $E^* = 197.8022 \times 10^6 Pa$, estos valores permanecen sin cambio en toda la vida útil del rodillo, por lo cual se considera constante para todas las campañas de laminación [10].

La longitud total de la lámina (L) producida se puede calcular utilizando la densidad del acero $\left(\delta = 7800 \frac{Kg}{m^3} \right)$, por lo tanto, para determinar el volumen se requiere de las dimensiones de la lamina tales como: espesor de salida (e_o) y ancho de la misma W . Algunas de estas variables se representan en la Figura 7.24 y la fórmula para el cálculo de la longitud total de la lámina queda de la siguiente manera:

$$L = \frac{Peso}{\delta W e_o} \quad (7.5)$$

Lo longitud total de la lámina cambia continuamente dependiendo de su calibre y ancho, por lo cual se requiere realizar este cálculo para cada rollo procesado.

El arco de contacto (l) se puede calcular utilizando la relación de velocidad angular con velocidad lineal el cual es $l = r\theta$, en donde θ según la Figura 7.24 se puede

calcular con la fórmula $\theta = \cos^{-1} \left(\frac{r - \frac{e_i - e_o}{2}}{r} \right)$. Por lo tanto la fórmula para calcular el

arco de contacto queda:

$$l = r \cos^{-1} \left(\frac{r - \frac{e_i - e_o}{2}}{r} \right) \quad (7.6)$$

El arco de contacto cambian continuamente dependiendo del porcentaje de reducción el cual está en función del calibre deseado, por lo cual se requiere realizar este cálculo para cada rollo procesado [10].

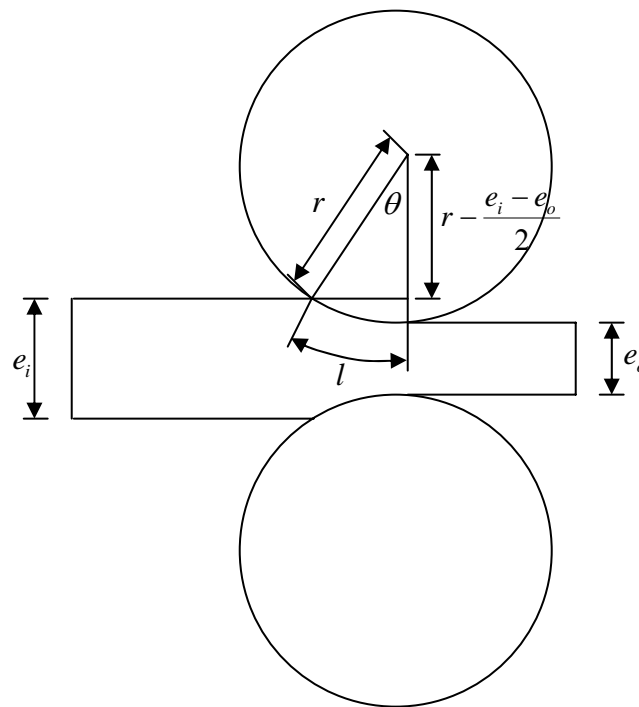


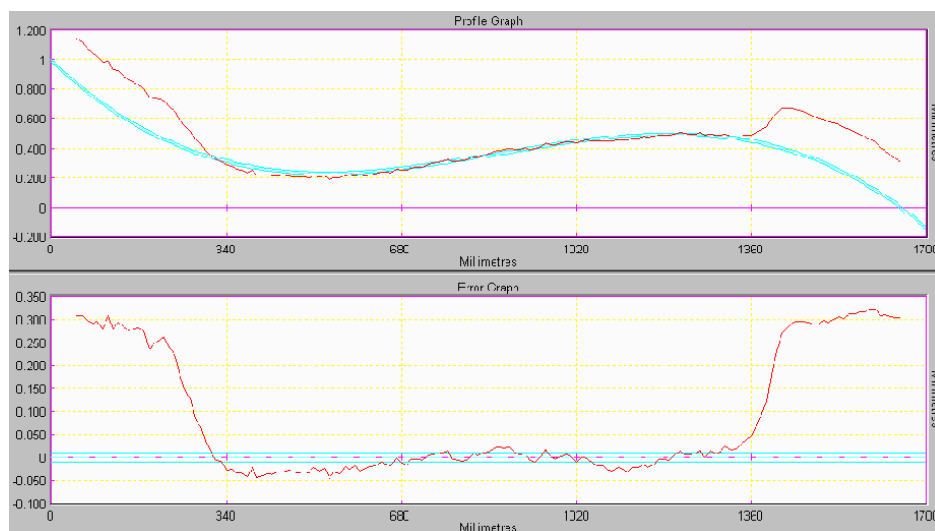
Figura 7.24.- Variables dimensionales del proceso.

El desarrollo de la tecnología ha generado importantes avances en el control de equipos, uno de estos casos es el modelo utilizado por los controles de los molinos que utilizan equipos muy sofisticados [12], estos equipos tienen programas que les permite realizar cálculos internos para determinar valores de variables que se utilizan para ejecutar ajustes o compensaciones en los controles cuando el producto procesado esta fuera de especificación. El control de estos equipos realiza un cálculo para el desgaste, sin embargo el desarrollo de éste no se especifica en la literatura existente, esto se debe a que este tipo de empresas se dedica a la venta y desarrollo de tecnología, por tal motivo no existe divulgación de literatura científica al respecto. En las Tablas VIIa, VIIb y VIIc del Anexo VII, se encuentran los cálculos para el modelo desarrollado en este estudio y se realiza una comparación con los datos obtenidos del molino de laminación, de igual manera se hace una comparación con los datos representados en las Figuras 7.25 a,b y c.

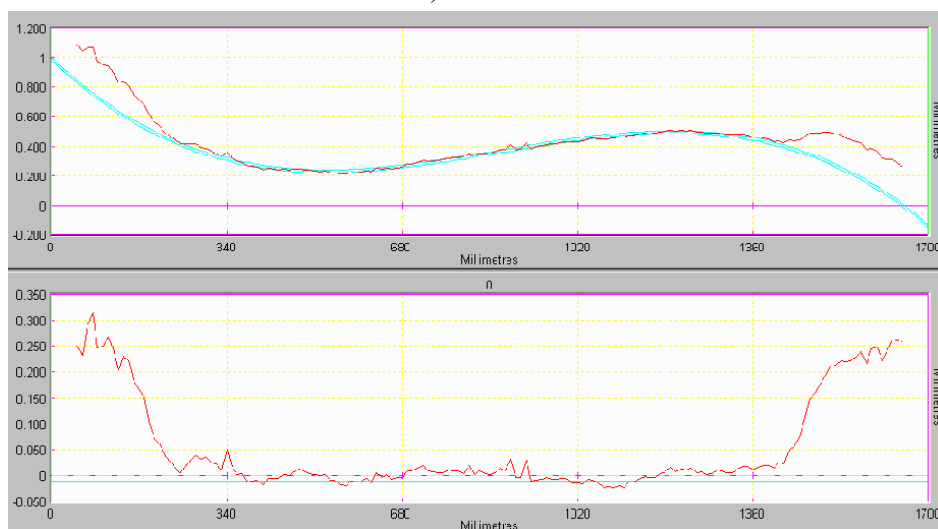
Con los resultados de esta comparación mostrados en la Tabla 7.8, se concluye que el desgaste obtenido por los tres métodos está muy cercano a la realidad, existiendo un margen de error de 0.03 mm (0.001 pulgadas), que representa el 13% del total de desgaste [1,3,4].

Desgaste (mm)				
Castillo	Modelo Generado	SMS	Gráfica	Diferencia
F-4	0.335725	0.340110	0.33	0.01
F-5	0.230796	0.264380	0.25	0.02
F-6	0.19504	0.212370	0.225	0.03

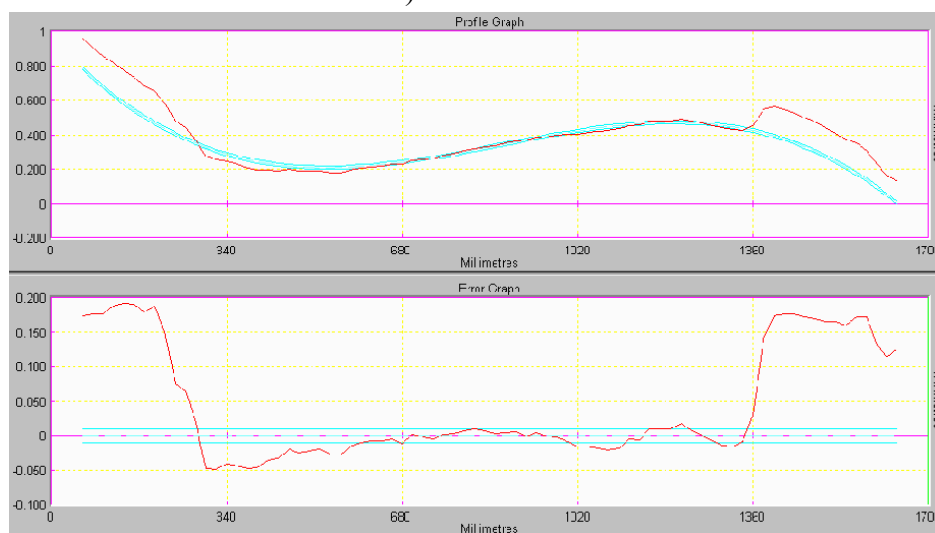
Tabla 7.8.- Comparación de valores obtenidos en los modelos analizados.



a) Castillo F-4



b) Castillo F-5



c) Castillo F-6

Figura 7.25.- Perfil de desgaste antes y después de una campaña de laminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Vladimir B. Ginzburg, High Quality Steel Rolling, Theory and practice, Marcel Dekker Inc., Nueva York, Estados Unidos de America, 1993.
- [2] B.M Kapadia, Rolling Mills Rolls, Fundamentals and Practice, Iron and Steel Society, Pennsylvania, Estados Unidos de America, 1998.
- [3] Mário Boccalini Jr., Felipe Gustavo Bernardes, Modelo e análise de desgaste de cilindros, Universidade de Sao Paulo, Escola Politecnica, Sao Paulo,SP-Brasil, 2005.
- [4] Jorge Ramirez Cuéllar, Julio C. Morales Chavela, Ignacio Sandoval Caballero, Miguel Cantú Rangel, José Olvera Briceño, Desgaste en rodillos de trabajo ICDP, HSS, HiCr en el cuarto castillo en un laminador tipo compacto y uno convencional de productos planos, División Aceros Planos Hylsa S.A de C.V, Universidad de Monterrey, San Pedro Garza García, N.L, México, 2005.
- [5] Donald R. Hill, L. Edward Gray, Cooling of Work Rolls in hot rolling mills, Iron and Steel Engineer, Estados Unidos de America, 1981.
- [6] Guillermo García Gil, Rafael Colás, Calculation of thermal crowning in work rolls from their cooling curves, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, San Nicolás de los Garza, N.L México. 2000.
- [7] Hot Strip Mill Profile and Flatness Study, Association of Iron and Steel Engineers, U.S.A, 1986.
- [8] K.L Jhonson. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña,1985.
- [9] R.D. Arnell, P.B Davies, J. Halling, T.L Whomes, Tribology, Principles and Design Applications, The Macmillan Press Ltd., Springer – Verlag, Nueva York, Estados Unidos de America, 1993.
- [10] Acos Villares S.A de C.V, Mechanicals Properties for Back Up and Centrifugally Rolls, Sao Paulo,SP-Brasil, 2005.
- [11] E. Oberg, F.D. Jones y H.L Horton, Machinery's Handbook, Nueva York, Estados Unidos de America, 1979.
- [12] SMS, Mechanicals Properties for Back Up and Centrifugally Rolls, Sao Paulo,SP-Brasil, 2005.

CAPITULO 8.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 CONCLUSIONES.

El análisis de laminación en caliente considera principalmente las variables implícitas en el proceso dentro de las cuales se encuentra el desgaste del rodillo como una variable más. El presente estudio contempla algo más que el análisis de desgaste en función de las variables de laminación, se establece la base aplicable directamente a la industria metalmecánica, específicamente, a los productores de lámina y a los fabricantes de rodillos de laminación.

Se confirmó que el desgaste que sufren los rodillos de laminación es ligeramente mayor para un rodillo que se encuentra operando en la posición inferior del castillo de laminación (variación de 2%), sin embargo este valor se puede despreciar para cuestiones prácticas, ya que los rodillos de laminación trabajan en parejas y se deben de rectificar con las mismas dimensiones para controlar la línea de paso y variación de velocidades lineales de la lámina en el molino.

Se comprobó que el desgaste de los rodillos tiene un comportamiento lineal y que disminuye conforme cambia del castillo inicial al final. También se pudo comprobar que este comportamiento es el mismo que se manifiesta en los coeficientes de desgaste obtenidos para el proceso de laminación.

Se comprobó que el coeficiente de desgaste para el área de contacto entre los dos rodillos es diferente al coeficiente de desgaste generado por el contacto del planchón y el rodillo de trabajo. Así mismo se demuestra que los coeficientes de desgaste serán variables y específicos para cada molino de laminación ya que el valor de estos depende de las variables de laminación en particular para cada estación.

Se estableció la curva para la caída de dureza, la cual está en función de la conducción de temperatura generada en el arco de contacto al momento de la deformación plástica del material laminado, con esta curva se demostró que la dureza disminuye proporcionalmente conforme se incrementa la temperatura del rodillo.

El modelo matemático generado ha servido de base para desarrollar nuevos modelos aplicables para el cálculo de desgaste de rodillos de apoyo, muestra de esto es la aplicación de este modelo en Altos Hornos de México, S.A de C.V, en donde establecieron su modelo de control para el rectificado de rodillos tomando como base la información generada en el presente estudio.

El modelo generado en este estudio permite que los usuarios de los molinos de laminación puedan determinar con un margen de error de 20% cual debe de ser el material a remover en sus máquinas rectificadoras después de cada campaña de laminación.

Se comprobó que el esfuerzo localizado, conocido en el medio de la laminación en caliente como " Orejas de Gato " se intensifica cuando se producen espesores de lámina muy delgados y se vuelve crítico si el grado de material que se procesa corresponde a un acero de alta resistencia. También se pudo observar que este fenómeno trae como consecuencia problemas de forma en la lámina procesada.

8.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

El desgaste de los rodillos de laminación tiene una gran influencia en el proceso de laminación en caliente. En el estudio desarrollado no se considera como un trabajo exhaustivo, sino como una línea de investigación que debe de continuar utilizando las bases aquí establecidas, para ello se propone considerar los siguientes temas de análisis:

- Establecer la relación que hay en la caída de dureza con el incremento de temperatura en el rodillo de laminación.
- Cuantificar los contenidos de carburos en las estructuras metalográficas y establecer una relación con la caída de dureza.
- Validar la teoría de B.M Kapadia y confirmar si realmente la profundidad del material fatigado mecánicamente es el mismo valor de la profundidad del perfil de desgaste.
- Desarrollar un modelo experimental para determinar el efecto del material laminado a diferentes velocidades de laminación y temperatura sobre el rodillo de laminación.
- Determinar un modelo matemático que describa el cambio dinámico del coeficiente de fricción durante el proceso de laminación en caliente.

8.3 RECOMENDACIONES PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL.

La Compañía Brasileña Aços Villares, S.A de C.V, está interesada en continuar con el análisis y desarrollo del modelo generado, para ello estableció un convenio de desarrollo tecnológico con la Universidad de São Paulo, Escola Politecnica y el Institute for Technological Research (IPT), ubicadas ambas instituciones en la Ciudad Universitaria de São Paulo, Brasil. En este proyecto los representantes de ambas instituciones están trabajando para establecer un modelo experimental que permita disminuir el margen de error para el coeficiente de desgaste y por consiguiente disminuir el error en el desgaste calculado.